

Universidade de Lisboa

Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Dinâmica Espacial e Temporal do Ravinamento na Margem Esquerda da
Bacia do Baixo Tejo: Formas, Processos e Factores**

Rafaello Costa Gomes Vieira Bergonse

Doutoramento em Geografia
Especialidade de Geografia Física

2014

Universidade de Lisboa

Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Dinâmica Espacial e Temporal do Ravinamento na Margem Esquerda da
Bacia do Baixo Tejo: Formas, Processos e Factores**

Rafaello Costa Gomes Vieira Bergonse

Tese orientada pelo Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis,
especialmente elaborada para a obtenção do grau de doutor em Geografia,
especialidade de Geografia Física

Esta dissertação foi financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/46949/2008.

AGRADECIMENTOS

Durante o período de elaboração do presente trabalho, muitas foram as pessoas que para ele contribuíram de uma forma ou de outra. Quero aqui salientar algumas, pedindo desde já desculpa por algum lapso.

Em primeiro lugar, quero expressar o meu profundo agradecimento ao orientador da dissertação, Prof. Dr. Eusébio Reis. O seu apoio manifestou-se ainda antes do surgimento de qualquer projecto, chamando-me a atenção para o concurso para atribuição de bolsas de doutoramento pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Sem o seu encorajamento nesta fase precoce, este trabalho nunca teria sido possível. Desde esta altura e até à finalização da dissertação, o Prof. Eusébio Reis esteve sempre disponível para discutir ideias, possibilidades, metodologias e resultados, encaminhando-me por um lado e deixando-me espaço livre para descobrir e experimentar por outro. A sua disponibilidade e empenho inextinguíveis, aliadas às suas qualidades científicas e humanas, fazem-me sentir profundamente grato pelo privilégio da sua orientação.

Quero agradecer à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pela concessão de uma Bolsa de Doutoramento (referência SFRH/BD/46949/2008). Sem este apoio, o presente trabalho nunca teria sido possível.

Ao Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa quero agradecer a disponibilização do Laboratório de Geografia Física. Mais especificamente, quero expressar um forte agradecimento ao grupo de investigação em Sistemas Litorais e Fluviais (SLIF) pelo apoio material com as muitas deslocações ao campo, o receptor GPS e as despesas associadas à restituição fotogramétrica, assim como pela disponibilização de um espaço de trabalho privilegiado.

Aos meus colegas do SLIF, quero agradecer o encorajamento e a constante disponibilidade para discutir e comparar metodologias e projectos. Em particular, quero agradecer ao Dr. André Torres pela ajuda na recolha bibliográfica e ao Prof. Dr. Jorge Trindade pelo apoio com o levantamento dGPS e com o tratamento dos dados. À Dra. Cristiana Aleixo, quero agradecer o apoio com o tratamento laboratorial das amostras de material. Finalmente, agradeço à Professora Ana Ramos Pereira pelo encorajamento constante e o apoio com a logística do trabalho de campo e dos materiais de laboratório. Agradeço ainda à Professora Catarina Ramos pela disponibilidade para discutir o projecto de investigação numa fase inicial do trabalho.

O Dr. João Bidarra, meu colega, manifestou-se sempre pronto para me ajudar com a selecção de fotografias aéreas e discutir as suas potenciais aplicações na investigação, oferecendo-me o benefício da sua grande experiência de fotogrametria. Quero aqui expressar-lhe a minha amizade e gratidão.

O Doutor Bruno Martins facultou-me a sua tese de doutoramento, gentileza que quero aqui agradecer.

Ao Prof. Fernando Girão Monteiro, do Instituto Superior de Agronomia, agradeço a gentileza de me receber, elucidando-me quanto a algumas metodologias de análise de solos.

As Engenheiras Alexandra Maia e Rosa Oliveira, da Município, apoiaram-me nas estéreo-restituições com os seus amplos conhecimentos técnicos.

Agradeço também à Comunidade Intermunicipal da Lezíria do Tejo pela disponibilização das fotografias aéreas de 2006, bem como da cartografia topográfica 1/10000 da área de estudo.

Durante o trabalho de campo, houve várias pessoas que contribuíram para tornar este trabalho possível. Na Chamusca, o Sr. João Isidro dos Reis recebeu-me gentilmente em sua casa e concedeu-me acesso à sua propriedade, pródiga em grandes complexos de ravinas. O Sr. António, guarda florestal, facultou-me contactos de proprietários e encarregados, facilitando-me o acesso às áreas de estudo na rib^a do Casal Velho e sempre se mostrando disponível para me esclarecer sobre a melhor forma de aceder a um ou outro local. Agradeço aqui a sua grande simpatia.

Não posso deixar de dedicar uma palavra de reconhecimento à empresa Google Inc. A sua ferramenta *Google Earth*, de utilização gratuita, permitiu-me numa fase inicial prospectar de forma rápida vastas extensões de território em fotografias aéreas sem qualquer custo. Sem este recurso, esta fase precoce do trabalho teria sido bem mais morosa.

Por último, quero expressar um profundo agradecimento à minha família, que esteve sempre disponível para me apoiar. Em particular, agradeço à minha mulher Teresa e ao meu filho Guilherme o muito tempo que pacientemente dispensaram ao meu trabalho, bem como o apoio e amor incondicional, possibilitando-me a paz de espírito necessária para levar a cabo esta investigação.

Índice Geral

Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xxi
Resumo	xxix
Abstract	xxxii
Introdução	1
I - A erosão do solo por ravinamento: um enquadramento teórico	7
1. Os conceitos de ravina e de ravinamento	9
2. Consequências e relevância no contexto da erosão hídrica do solo	12
3. Tipologias e contextos espaciais	16
4. Mecanismos e processos de surgimento e evolução	18
4.1. O escoamento superficial	18
4.1.1. Erosividade	19
4.1.1.1. Parâmetros de erosividade	19
4.1.1.2. Factores de erosividade: precipitação	26
4.1.1.3. Factores de erosividade: rugosidade hidráulica	28
4.1.1.4. Factores de erosividade: infiltração	31
Humidade antecedente do solo	32
Porosidade, textura e estrutura do solo	33
Fragmentos de rocha	35
Matéria orgânica	36
Estabilidade dos agregados	36
4.1.2. Erodibilidade	42
4.1.2.1. Factores de erodibilidade: textura	43

4.1.2.2. Factores de erodibilidade: resistência tangencial	46
Teor em humidade	47
Compactação	47
Consolidação após perturbações	48
Raízes das plantas	48
4.1.2.3. Factores de erodibilidade: cobertura por fragmentos de rocha	51
4.1.3. A relação erosividade/erodibilidade na acção erosiva do escoamento: algumas conclusões	52
4.2. Movimentos de massa	55
4.2.1. A tubulação (<i>piping</i>): natureza e factores	59
5. Padrões de desenvolvimento	64
5.1. Ciclos e fases de evolução	64
5.2. Uma relação dinâmica entre processos: escoamento e movimentos de massa	66
5.3. Limiares geomórficos	68
6. Discussão: para um enquadramento teórico coerente	69
7. O Ravinamento em Portugal	74
8. Conclusões	76
II - Os padrões espaciais do ravinamento na margem esquerda da bacia do Baixo Tejo: uma perspectiva regional	79
Introdução	81
1. Caracterização da área de estudo	82
2. Delimitação de Unidades Espaciais Homogéneas	88
2.1. Índices topográficos	89
2.1.1. Índice Topográfico de Encharcamento	91
2.1.2. Índice de Potência do Escoamento	93
2.2. Litologia	96
2.3. Solos	100
2.4. Resultados	106

3. Delimitação, validação e caracterização dos padrões de ravinamento	108
3.1. Padrões gerais de ravinamento	120
3.2. Relações entre formas individuais e factores de controlo	131
3.2.1 Padrões Gerais de Ravinamento A-E	134
3.2.2 Padrões Gerais de Ravinamento F-H	140
3.2.2.1. Litologia	140
3.2.2.2. Tipo de solo	143
3.2.2.3. Índices topográficos	144
Índice Topográfico de Encharcamento (ITE)	144
Índice de Potência do Escoamento (IPE)	147
3.2.2.4. Uso do solo	148
4. Discussão	150
4.1. Padrões gerais de ravinamento e factores de controlo	150
4.1.1. Grandes ravinas e complexos de ravinas: PGR A-E	151
4.1.2. Formas relativamente incipientes: PGR F-H	158
4.2. Ravinas sem padrão: a influência dos elementos antrópicos	161
4.3. Implicações teóricas	163
5. Conclusões e questões para investigação futura	168
III - Os complexos de ravinas das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho: forma, processos, controlos e dinâmica recente	173
1. As Ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho: um enquadramento	176
1.1. O contexto topográfico	178
1.2. O contexto litológico	184
2. Padrões gerais de dimensão, forma e localização: características e controlos	187
2.1. Aquisição dos dados	187
2.2. Área e perímetro	192
2.2.1. Formas foto-interpretadas	194

2.2.2. Formas levantadas com dGPS	197
2.2.3. O erro associado ao pressuposto de topografia plana: análise dos resultados	198
2.3. Sinuosidade	207
2.4 Distância à desembocadura	207
2.5. Controlos topográficos: declive e curvatura	210
2.5.1 Estimação da topografia pré-entalhe	215
Interpolação de áreas em falta	216
2.5.2. Cálculo dos declives e curvaturas	227
2.6. Área de drenagem na desembocadura, e razão área real - área de drenagem na desembocadura	227
2.6.1. Cálculo das áreas de drenagem	232
2.7. Orientação das vertentes	233
2.7.1. Cálculo da orientação das vertentes	235
2.8. Índice de Potência do Escoamento e Índice Topográfico de Encharcamento	237
3. Análise	237
3.1. Área, perímetro e sinuosidade: uma caracterização	239
3.2. Correlação linear entre pares de variáveis	240
3.2.1. Natureza das relações bivariadas	243
3.3. Modelação	253
3.3.1. Dimensões e sinuosidade: regressão linear múltipla	253
Aplicação e resultados	254
3.3.2. Distribuição das formas: regressão logística	260
Aplicação e resultados	262
3.3.3. Padrões gerais de dimensão, forma e localização: integração dos resultados	281
4. Morfologia, processos e factores: uma caracterização da dinâmica actual e recente	284
4.1. Morfologia	287
4.1.1. Área, perímetro, sinuosidade e grau de desenvolvimento	287
4.1.2. Comprimento	287

4.1.3. Variáveis baseadas na largura	289
4.1.4. Volume	290
4.1.5 Variáveis baseadas na profundidade	294
4.1.6. Variáveis baseadas no declive	295
4.1.7. Concavidade longitudinal	299
4.1.8. Análise das relações e padrões morfológicos	301
4.1.8.1. Correlação linear bivariada	301
4.1.8.2. Análise de componentes principais	312
4.2. Processos	317
4.3. Relações Processos-Morfologia	323
Relações Processos-Morfologia: uma síntese	333
4.4. Factores de controlo	334
4.4.1. Obtenção dos dados	335
4.4.1.1. Litologia	337
Etapa 1 - Contextos litológicos gerais	338
Etapa 2 - Principais unidades litológicas: análise e características	345
4.5. Relações Morfologia - Factores de controlo	360
4.5.1. Morfologia e topografia pré-erosão: regressão linear bivariada	361
4.5.2. Morfologia e Litologia: análise discriminante	368
4.6. Relações Factores de controlo - Processos	381
4.6.1. Factores quantitativos e processos: análise discriminante.	382
4.6.2. Litologia e processos	389
4.7. Evolução recente: 1970-2006	393
5. Os complexos de ravinas das Ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho: uma perspectiva integral	398
Conclusões finais	405
Referências bibliográficas	415
Anexos	

Índice de Figuras

Figura 1 - Contextos topográficos do surgimento de ravinas	18
Figura 2 - Esquema simplificado das relações transporte/destacamento	23
Figura 3 - Curva de Philip	33
Figura 4 - Velocidade tangencial crítica necessária para o destacamento em função da dimensão das partículas	44
Figura 5 - Relação entre algumas classes de textura do solo e a sua resistência à erosão por escoamento concentrado	45
Figura 6 - Ciclo hipotético de recuo de cabeceiras proposto por Collison (2001)	58
Figura 7 - Sistemas de ravinas em rede e em complexo	71
Figura 8 - A área de estudo: hipsometria, principais cursos de água e enquadramento face ao curso do Tejo	84
Figura 9 - Distribuição espacial do uso do solo na área de estudo, de acordo com a cartografia CORINE Land Cover 2006	87
Figura 10 - Relação entre Índice Topográfico de Encharcamento e área relativa acumulada	92
Figura 11 - O Índice Topográfico de Encharcamento na área de estudo: distribuição das classes, delimitação de padrões e identificação dos padrões delimitados	93
Figura 12 - Relação entre Índice de Potência do Escoamento e área relativa acumulada	94
Figura 13 - O Índice de Potência do Escoamento na área de estudo: distribuição das classes, delimitação de padrões e identificação dos padrões delimitados.	95
Figura 14 - Distribuição da litologia na área de estudo	99
Figura 15 - Os solos na área de estudo: distribuição de tipos, padrões espaciais delimitados e a sua identificação	104
Figura 16 - Área relativa acumulada por UEH com área igual ou superior a 0,5% da área total	106
Figura 17 - Localização das dez UEH mais importantes do conjunto de 131 definido	107
Figura 18 - Os padrões de ravinamento foto-interpretados e a fracção sujeita a análise de campo	110
Figura 19 - Indicadores de erosão passada	112
Figura 20 - Exemplo de um padrão associado a paleo-ravinamento	112

Figura 21 - Dois exemplos da caracterização de padrões foto-interpretados com base na análise de campo de padrões análogos	113
Figura 22 - Os padrões de ravinamento eliminados e o conjunto final de 55	114
Figura 23 - Um complexo de ravinas classificado como inactivo, e outro classificado como parcialmente activo	120
Figura 24 - Distribuição espacial dos Padrões Gerais de Ravinamento na área de estudo	121
Figura 25 - Exemplo de Padrão Geral de Ravinamento de tipo A	121
Figura 26 - Exemplo de Padrão Geral de Ravinamento de tipo B	123
Figura 27 - Exemplo de Padrão Geral de Ravinamento de tipo C	124
Figura 28 - Exemplo de Padrão Geral de Ravinamento de tipo D	125
Figura 29 - Exemplo de Padrão Geral de Ravinamento de tipo E	126
Figura 30 - Exemplo de PGR E apresentando formas limitadas a montante pela superfície culminante	126
Figura 31 - Relações entre entalhe fluvial e ravinamento e entre formas simples e em complexos inerentes aos PGR D e E	127
Figura 32 - Exemplos de formas incipientes controladas pela topografia	129
Figura 33 - Exemplos de formas entalhadas	130
Figura 34 - Dois exemplos de influências da acção antrópica sobre o ravinamento	131
Figura 35 - Padrão Geral de Ravinamento de tipo H	131
Figura 36 - Percentagens de área ocupada por cada tipo de litologia em cada uma das formas individuais associadas aos PGR A a E	136
Figura 37 - Formas desenvolvidas ao longo da rede de drenagem, entalhando terraços (Q_1 , Q_2 e Q_3), delimitadas sobre a Carta Geológica de Portugal 1:50000	138
Figura 38 - As mesmas formas da Figura 37, sobrepostas à topografia 1:25000 e a um relevo de sombras (<i>Hillshade</i>)	138
Figura 39 - Percentagens de área ocupada por tipo de litologia e por forma individual nos PGR F e G	141
Figura 40 - Percentagens do comprimento de cada forma individual correspondentes a cada tipo de solo (classificado ao nível da família) para os PGR F, G e H	143
Figura 41 - Percentagens do comprimento de cada forma individual correspondentes a cada classe CORINE de uso do solo para os PGR F, G e H	149
Figura 42 - Formas desconectadas face a um fundo de vale aluvionar, não entalhado	151
Figura 43 - Exemplo da desconexão quase total entre as formas e os seus vales colectores	152

Figura 44 - Relação hipotética entre os PGR definidos e a evolução da drenagem	154
Figura 45 - Os cinco cursos de água considerados na comparação de declives e comandos em perfis transversais	156
Figura 46 - Declives médios das vertentes encaixantes nos vários perfis transversais estudados	156
Figura 47 - Comandos médios para os vários perfis transversais estudados	157
Figura 48 - Sobreposição de quatro formas associadas ao PGR G à carta militar e ao tema de Índice de Potência do Escoamento, classificado de forma a evidenciar os contrastes existentes	160
Figura 49 - A aparente influência do uso do solo sobre a erosão	161
Figura 50 - Exemplos de ravinamento em associação a estradas não pavimentadas e caminhos	162
Figura 51 - Associação entre ravinamento e desníveis topográficos	163
Figura 52 - Associação entre ravinamento e valas de drenagem	163
Figura 53 - Analogias morfológicas na formação e expansão de cabeceiras em diferentes escalas de análise e em diferentes materiais	166
Figura 54 - Analogias morfológicas entre complexos de ravinas em diferentes contextos litológicos	167
Figura 55 - Hipsometria das duas bacias em estudo e seu respectivo enquadramento face à bacia portuguesa do Tejo e à totalidade da área considerada no presente trabalho	176
Figura 56 - Dois exemplos da natureza incipiente dos solos nos contextos de ocorrência dos complexos de ravinas estudados	177
Figura 57 - Os onze sectores definidos ao longo das vertentes em cada uma das duas bacias	182
Figura 58 - Um exemplo da topografia complexa encontrada nas duas bacias	183
Figura 59 - Unidades morfológicas e classes de litologia nas duas bacias em estudo	185
Figura 60 - Localização, no contexto das duas bacias estudadas, do conjunto de 90 formas foto-intepretadas e do sub-conjunto de 30 sujeito a um levantamento dGPS detalhado	188
Figura 61 - Um exemplo da generalização inerente à Carta Geológica 1:50000	191
Figura 62 - Relações trigonométricas entre a hipotenusa h , representando a vertente real ao longo da qual formas hipotéticas estão situadas e o cateto a , representando um plano horizontal sobre o qual as formas são projectadas durante o processo de vectorização	192
Figura 63 - Representação num referencial tridimensional da distância d entre dois pontos hipotéticos e das distâncias utilizadas para a estimar, através da consideração de d em termos da hipotenusa de um triângulo rectângulo	195

Figura 64 - Distribuição do erro percentual relativo para os conjuntos de 30 formas levantadas com dGPS e de 90 formas foto-interpretadas	200
Figura 65 - Distribuições do erro percentual relativo para o conjunto de 30 formas levantadas com dGPS, usando alternativamente os valores altimétricos levantados e cartografias topográficas de escalas 1:10000 e 1:25000	203
Figura 66 - As nove formas básicas de vertente resultantes das várias combinações entre curvaturas planares e de perfil positivas, negativas, ou nulas.	212
Figura 67 - Dois exemplos da expressão das formas em estudo nas curvas de nível 1:10000	214
Figura 68 - O efeito da suavização associado a diferentes métodos de interpolação	218
Figura 69 - O zonamento definido sobre as 50 áreas de teste	223
Figura 70 - Três exemplos de reconstrução da topografia usando o método e a parametrização considerados ótimos	226
Figura 71 - Topografia e rede de drenagem modeladas triangulando um TIN (a) e usando o algoritmo <i>Topo to Raster</i>	233
Figura 72 - Percentagem de formas por orientação dominante	236
Figura 73 - Relação entre frequência acumulada de formas e área, perímetro e sinuosidade, com valores organizados por ordem crescente	239
Figura 74 - Relação entre área e perímetro, com as formas separadas por classe de exposição dominante	244
Figura 75 - Relação entre a área e o indicador de sinuosidade utilizado, por classe de exposição dominante	245
Figura 76 - Gráficos de dispersão para cada par de variáveis com correlações significativas considerado relevante	246
Figura 77 - Gráfico de dispersão relacionando a área das formas com a razão perímetro/área	251
Figura 78 - Diagramas de extremos e quartis (<i>box-plots</i>) para os valores das variáveis consideradas relevantes em áreas não entalhadas e entalhadas	266
Figura 79 - Percentagens de pontos associados às diferentes classes de orientação das vertentes, em áreas entalhadas e não entalhadas.	267
Figura 80 - Relação entre a orientação das vertentes e a rede de drenagem para 44 formas na margem sul da Rib ^a de Ulme	267
Figura 81 - Curva ROC construída com base na validação independente do modelo de regressão logística	271
Figura 82 - Distribuição dos pontos sobre áreas entalhadas e não entalhadas pelos valores de probabilidade calculados com relação ao conjunto de 267 pontos para validação	272

Figura 83 - Relação entre presença/ausência de ravinamento e a sua probabilidade de ocorrência de acordo com um modelo ajustado aos 800 pontos conhecidos	272
Figura 84 - Diagramas de extremos e quartis (<i>box-plots</i>) para os valores das variáveis consideradas relevantes, em áreas não entalhadas, e nas desembocaduras das formas	277
Figura 85 - Distribuição dos pontos sobre áreas entalhadas e não entalhadas pelos valores de probabilidade gerados usando o modelo centrado nas áreas de desembocadura com melhor capacidade discriminante	281
Figura 86 - Uma representação gráfica do enquadramento conceptual do ravinamento que serviu de referência às análises realizadas sobre os 30 sistemas de ravinhas	286
Figura 87 - Dois exemplos das linhas construídas a fim de caracterizar as formas quanto ao comprimento	288
Figura 88 - Dois exemplos da divisão em sectores adoptada para caracterizar a largura das formas	290
Figura 89 - Exemplo dos modelos TIN da aproximação à topografia pré-erosão e da topografia em 2006	293
Figura 90 - Sectores de referência utilizados na caracterização morfológica dos complexos de ravinhas	297
Figura 91 - Linhas de drenagem principais definidas a fim de servir de referência ao cálculo do declive no fundo dos sistemas de ravinhas	298
Figura 92 - Esquema dos factores usados no índice de concavidade construído	300
Figura 93 - Relações entre a área, o perímetro e o indicador de sinuosidade	302
Figura 94 - Relações entre a área e o comprimento, a largura média e a profundidade média	303
Figura 95 - Relações entre a área e a profundidade média, e entre a área e o volume	304
Figura 96 - Relações entre o comprimento, a largura média e a profundidade média	305
Figura 97 - Relações entre a largura média e a razão largura média/profundidade média, e entre o comprimento e a razão comprimento/largura média	305
Figura 98 - Relações entre a área e a largura média nos três sectores de referência	307
Figura 99 - Relações entre área e profundidade média nos três sectores de referência	307
Figura 100 - Relações entre área e declive no fundo nos três sectores de referência	308
Figura 101 - Relações entre declive e declive no fundo nos três sectores de referência	309
Figura 102 - Relações entre grau de desenvolvimento e a razão largura média-profundidade média para a totalidade das formas e para os sectores montante e intermédios	310

Figura 103 - Relações entre grau de desenvolvimento, declive nos sectores intermédio e jusante e o declive no fundo no sector jusante	310
Figura 104 - Distribuição dos valores próprios (<i>Eigenvalues</i>) por componente principal, para um conjunto inicial de 15 componentes	314
Figura 105 - Dois exemplos de fundos dominados por vegetação	319
Figura 106 - Percentagens de formas por classe de cada variável processual	321
Figura 107 - Fracturas de tensão ao longo do perímetro da forma F29; padrão de fracturação por dessecação na forma F26.	322
Figura 108 - <i>Fluting</i> bem desenvolvido na forma F27	323
Figura 109 - <i>Scores</i> da função discriminante por classe de vegetação na cabeceira	328
Figura 110 - <i>Scores</i> da função discriminante por classe de dinâmica na cabeceira	328
Figura 111 - <i>Scores</i> das duas funções discriminantes por classe de vegetação nas paredes	329
Figura 112 - <i>Scores</i> das duas funções discriminantes por classe de dinâmica nas paredes	330
Figura 113 - <i>Scores</i> da função discriminante por classe de fracturação por tensão ao longo dos perímetros	331
Figura 114 - <i>Scores</i> da função discriminante por classe de fracturação por dessecação	332
Figura 115 - <i>Scores</i> da função discriminante por classe de ocorrência de <i>fluting</i>	333
Figura 116 - Transição entre conglomerados e arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas na forma F02	340
Figura 117 - Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas pontuais (formação 3), na forma F01	341
Figura 118 - Material relativamente argiloso alaranjado a avermelhado (formação 4), tal como ocorre na forma F29	341
Figura 119 - Padrão mesclado de manchas avermelhadas e esbranquiçadas, indicando drenagem reduzida e interpretado como sugerindo um elevado teor em argila	342
Figura 120 - As duas formações associadas exclusivamente à forma F06	342
Figura 121 - Sucessão de arenitos de cor alaranjada a avermelhada com cascalho e arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e intercalações relativamente argilosas	344
Figura 122 - Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e intercalações relativamente argilosas (formação 2) na parede da forma F10	344
Figura 123 - Material avermelhado relativamente argiloso (formação 3), dominando a forma F26	345

Figura 124 - Relação entre o diâmetro mediano máximo dos sedimentos e a dimensão adequada para uma amostra representativa	348
Figura 125 - A placa perfurada em utilização no terreno; o peneiro usado no laboratório	349
Figura 126 - Valores médios do Índice de Middleton obtidos por tipo de material	352
Figura 127 - Diagrama dos procedimentos levados a cabo na análise textural	354
Figura 128 - Percentagem representada por cada classe granulométrica adoptada nos tipos de rególito da margem esquerda da Rib ^a de Ulme	357
Figura 129 - Percentagem representada por cada classe granulométrica adoptada nos tipos de rególito da margem direita da Rib ^a de Ulme	359
Figura 130 - Gráficos de dispersão representando cada uma das relações bivariadas estatisticamente significativas	363
Figura 131 - <i>Scores</i> da função discriminante usando nove perfis litológicos	371
Figura 132 - <i>Scores</i> da função discriminante usando oito perfis litológicos	373
Figura 133 - <i>Scores</i> da função discriminante usando os seis perfis litológicos	374
Figura 134 - <i>Scores</i> da função discriminante usando cinco perfis litológicos	376
Figura 135 - <i>Scores</i> das duas primeiras funções discriminantes extraídas por perfil litológico (quatro perfis)	378
Figura 136 - <i>Scores</i> das duas funções discriminantes extraídas por perfil litológico (três perfis)	380
Figura 137 - Distribuição dos valores próprios por componente principal, para um conjunto inicial de 10 componentes	385
Figura 138 - <i>Scores</i> da função discriminante por classe de fracturação por dessecação	388
Figura 139 - Distribuição das formas por classe de ocorrência de fragmentação por dessecação e contexto litológico	391
Figura 140 - Distribuição das formas por classe de dinâmica na cabeceira e contexto litológico	391
Figura 141 - Dois exemplos da reduzida evolução das formas ao longo de cerca de 48 anos	394
Figura 142 - Relação entre o volume dos sistemas de ravinas em 1970 e a sua evolução em volume no período 1970-2006	396
Figura 143 - Relação entre a área dos sistemas de ravinas em 1970 e a sua evolução em área no período 1970-2006.	397
Figura 144 - As três componentes conceptuais do ravinamento adoptadas e as técnicas utilizadas na análise das suas inter-relações	400

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Algumas definições de “ravina” na literatura publicada	10
Tabela 2 - Classes CORINE Land Cover na área de estudo e respectivas áreas absolutas e relativas	86
Tabela 3 - Características dos padrões espaciais definidos de Índice Topográfico de Encharcamento	92
Tabela 4 - Características dos padrões espaciais definidos de Índice de Potência do Escoamento	95
Tabela 5 - As diferentes unidades litológicas na área de estudo e as suas áreas absolutas e relativas	98
Tabela 6 - Áreas absolutas e relativas dos padrões litológicos delimitados e das suas litologias constituintes	100
Tabela 7 - Áreas absolutas e relativas das ordens e subordens de solos na área de estudo	102
Tabela 8 - Áreas absolutas e relativas dos padrões de solos delimitados, e das ordens de solos que os constituem	105
Tabela 9 - Combinações específicas de factores de controlo e áreas associadas às dez UEH mais extensas	107
Tabela 10 - Parâmetros utilizados na caracterização dos padrões de ravinamento	111
Tabela 11 - Características das formas associadas aos 55 padrões de ravinamento finais	115
Tabela 12 - Tipos de formas encontradas e modos de organização	117
Tabela 13 - Modos de organização	118
Tabela 14 - Nº de padrões por classe de dimensão das ravinas, por tipo e modo de organização	118
Tabela 15 - Nº de padrões por classe de dimensão dos complexos, por modo de organização	118
Tabela 16 - Nº de padrões por classe de actividade das ravinas, por tipo e modo de organização	118
Tabela 17 - Nº de padrões por classe de actividade dos complexos, por modo de organização	119
Tabela 18 - Nº de padrões por classe de actividade, dimensão e tipo: ravinas	119
Tabela 19 - Nº de padrões por classe de actividade e dimensão: complexos	119

Tabela 20 - Características da georreferenciação das folhas da Carta Geológica de Portugal 1:50000	133
Tabela 21 - Correspondência entre as formações nas folhas da Carta Geológica de Portugal 1:50000 e 1:500000	135
Tabela 22 - Percentagens de área associadas às diferentes litologias nas formas dos PGR A a E	137
Tabela 23 - Resultados do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para as percentagens de área associada a cada uma das duas litologias predominantes nas formas extraídas de cada PGR	139
Tabela 24 - Resultados da comparação entre os conjuntos de formas dos diferentes PGR utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov	140
Tabela 25 - Distribuição das diferentes litologias nas ravinas dos PGR F, G e H	140
Tabela 26 - Resultados do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para as formas extraídas dos PGR F e G, com respeito à incidência das duas principais litologias	142
Tabela 27 - Resultados da comparação entre os conjuntos de formas de todos os diferentes PGR quanto à incidência das duas principais litologias utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov	142
Tabela 28 - Síntese da distribuição dos valores de ITE médio e máximo pelas formas associadas aos PGR F, G e H	145
Tabela 29 - Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para a normalidade das distribuições associadas ao ITE	145
Tabela 30 - Resultados do teste de Levene à homogeneidade das variâncias entre conjunções de formas dos vários PGR (F-H)	146
Tabela 31 - Resultados do teste t para a diferença entre médias dos conjuntos de formas associados a cada PGR (F-H), com relação aos valores de ITE	146
Tabela 32 - Síntese da distribuição dos valores de IPE pelas formas seleccionadas nos PGR F, G e H	147
Tabela 33 - Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para a normalidade das distribuições associadas ao IPE	147
Tabela 34 - Resultados da comparação entre as formas associadas aos PGR F, G e H quanto aos valores de IPE médio e IPE máximo	148
Tabela 35 - Distribuição dos declives por unidade do relevo nas duas bacias em estudo	179
Tabela 36 - Distribuição das curvaturas planar e de perfil por unidade do relevo nas duas bacias em estudo	180
Tabela 37 - Valores médios de declive, curvatura planar e curvatura de perfil por sector, para as vertentes nas bacias das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho	182

Tabela 38 - Área ocupada por cada uma das formações litológicas no contexto da totalidade da ribeira de Ulme, e face às respectivas unidades morfológicas	186
Tabela 39 - Área ocupada por cada uma das formações litológicas no contexto da totalidade da ribeira do Vale do Casal Velho, e face às respectivas unidades morfológicas	186
Tabela 40 - Erros posicionais obtidos no levantamento dGPS dos perímetros das formas	190
Tabela 41 - Dimensões reais e aparentes das 90 formas foto-interpretadas	196
Tabela 42 - Dimensões reais e aparentes das 30 formas levantadas no terreno com dGPS	199
Tabela 43 - Síntese das diferenças entre dimensões reais e aparentes para as 30 formas levantadas com dGPS e as 90 formas vectorizadas a partir de ortofotos	199
Tabela 44 - Valores de erro relativo e absoluto resultantes da assunção de topografia plana adoptando como fontes de altimetria os dados dGPS e a cartografia topográfica 1:10000 e 1:25000	202
Tabela 45 - Resultados do teste <i>t</i> em ordem a averiguar as diferenças entre os valores de erro percentual relativo para o mesmo conjunto de 30 formas usando informação altimétrica obtida com dGPS e cartografias topográficas 1:10000 e 1:25000	202
Tabela 46 - Alguns exemplos de contextos topográficos extraídos da literatura, e o erro percentual relativo estimado como função do declive	206
Tabela 47 - Valores obtidos para a diferença entre o perímetro real de cada forma e o perímetro de um círculo de igual área, enquanto indicador de sinuosidade	208
Tabela 48 - Distância entre cada uma das 90 formas foto-interpretadas e a desembocadura da respectiva bacia	211
Tabela 49 - Características gerais de alguns métodos de interpolação utilizados para produzir estruturas matriciais	219
Tabela 50 - Características das distribuições de erro absoluto associadas a cada um dos métodos de interpolação testados	223
Tabela 51 - Resultados da optimização dos parâmetros de entrada dos dois métodos com menor erro	225
Tabela 52 - Curvaturas de perfil e planar mínimas, médias e máximas, e declives médios e máximos associados a cada forma	228
Tabela 53 - Áreas de drenagem medidas na desembocadura de cada forma (<i>Adren</i>), e razão entre a área real da forma e <i>Adren</i> , utilizada como indicador do grau de desenvolvimento	234
Tabela 54 - Orientação dominante por forma	236
Tabela 55 - Valores máximos e médios de Índice de Potência do Escoamento e Índice Topográfico de Encharcamento no interior da topografia antecedente de cada uma das 90 formas	238
Tabela 56 - Parâmetros descritivos das distribuições de Área, Perímetro e Sinuosidade	240

Tabela 57 - Coeficientes de correlação linear entre pares de variáveis em estudo	241
Tabela 58 - Coeficientes de determinação obtidos após o ajustamento experimental de diferentes funções para representar as relações entre pares de variáveis	250
Tabela 59 - Resultados das regressões tendo a área das formas <i>Ar</i> como variável dependente	257
Tabela 60 - Resultados da regressão tendo como variável dependente <i>Ar</i> , e cumprindo o pressuposto da normalidade dos resíduos	258
Tabela 61 - Resultados das regressões tendo o perímetro das formas <i>Pr</i> como variável dependente	258
Tabela 62 - Resultados das regressões tendo a sinuosidade das formas <i>Pr-Pcirc</i> como variável dependente	259
Tabela 63 - As três equações de regressão melhor ajustadas aos dados de modelação e o seu ajustamento aos valores dos 30 complexos de ravinas independentes	259
Tabela 64 - Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov e de Levene à normalidade e à homogeneidade de variâncias, pressupostos dos testes paramétricos de diferenciação estatística	264
Tabela 65 - Resultados dos testes de diferenciação estatística usados para aferir diferenças entre os valores amostrados para áreas não entalhadas e áreas correspondentes a formas erosivas	264
Tabela 66 - Valores da média e do percentil 90 para as amostras de cada uma das variáveis consideradas relevantes	266
Tabela 67 - Correlações lineares e respectivas margens de erro entre as variáveis consideradas relevantes como factores de controlo da presença de formas erosivas	268
Tabela 68 - Resultados da regressão logística utilizando a única variável independente considerada significativa segundo o teste de Wald	268
Tabela 69 - Resultados da validação do modelo de regressão logística com recurso ao conjunto independente de 267 pontos	270
Tabela 70 - Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov e de Levene à normalidade e à homogeneidade de variâncias para as variáveis em análise	275
Tabela 71 - Resultados dos testes de diferenciação estatística usados para aferir diferenças entre os valores amostrados para áreas não entalhadas e para os sectores de desembocadura das actuais formas erosivas	276
Tabela 72 - Valores da média e do percentil 90 para as amostras de cada uma das variáveis	278
Tabela 73 - Coeficientes de correlação linear e respectivas margens de erro entre as variáveis analisadas	279
Tabela 74 - Resultados da regressão logística utilizando as quatro variáveis consideradas significativas segundo o teste de Wald	279

Tabela 75 - Resultados da regressão logística removendo a distância à desembocadura das variáveis consideradas significativas	279
Tabela 76 - Validação do modelo de regressão logística incluindo a distância à desembocadura com recurso ao conjunto independente de 267 pontos	280
Tabela 77 - Validação do modelo de regressão logística excluindo a distância à desembocadura com recurso ao conjunto independente de 267 pontos	280
Tabela 78 - Valores de Área, Perímetro, Sinuosidade, e razão Área real/Área de drenagem na desembocadura calculados para as 30 formas	288
Tabela 79 - Comprimentos estimados para as 30 formas	289
Tabela 80 - Variáveis relacionadas com a largura	291
Tabela 81 - Volumes obtidos com base nos pontos estéreo-restituídos	294
Tabela 82 - Variáveis relacionadas com a profundidade	296
Tabela 83 - Declive médio por sector	298
Tabela 84 - Declive médio ao longo do fundo das formas, por sector	299
Tabela 85 - Valores de Índice de concavidade por forma	301
Tabela 86 - Proporção da variância explicada por cada uma das 15 componentes principais definidas numa análise preliminar	313
Tabela 87 - Coeficientes de correlação linear (<i>loadings</i>) entre as 30 variáveis de entrada e as seis componentes principais definidas	315
Tabela 88 - Valores (<i>scores</i>) associados a cada um dos 30 sistemas de ravinas nas seis componentes principais definidas	316
Tabela 89 - Variáveis e classes adoptadas na caracterização das formas quanto aos processos	318
Tabela 90 - Resultados da caracterização das formas quanto aos processos	320
Tabela 91 - Número de sistemas de ravinas por classe de cada variável processual	320
Tabela 92 - Resultados da análise discriminante	327
Tabela 93 - Valores obtidos para alguns dos potenciais factores de controlo considerados	336
Tabela 94 - Valores obtidos para os restantes potenciais factores de controlo considerados	337
Tabela 95 - Perfis observados ao longo das paredes e cabeceiras das formas na margem esquerda da ribeira de Ulme	339
Tabela 96 - Perfis observados ao longo das paredes e cabeceiras das formas ocorrendo na margem direita da ribeira de Ulme	343
Tabela 97 - Os diferentes contextos litológicos definidos para os 30 sistemas de ravinas em estudo	345

Tabela 98 - O conjunto de amostras recolhido e as litologias associadas	347
Tabela 99 - Fracção <0,063 mm obtida usando dispersante e água desionizada por amostra, valor do Índice de Middleton resultante, e respectiva média e desvio-padrão	351
Tabela 100 - Resultados das análises texturais para os tipos de rególito definidos para a margem esquerda da ribeira de Ulme	355
Tabela 101 - Resultados das análises texturais para os tipos de rególito definidos para a margem direita da ribeira de Ulme	356
Tabela 102 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as seis Componentes Principais e os 13 possíveis factores de controlo quantitativos	362
Tabela 103 - Os 9 perfis litológicos utilizados na análise discriminante	370
Tabela 104 - Resultados da análise discriminante usando 9 perfis litológicos	371
Tabela 105 - Os oito perfis utilizados na análise, após a agregação dos dois caracterizados exclusivamente por materiais relativamente argilosos	372
Tabela 106 - Resultados da análise discriminante usando os oito perfis	373
Tabela 107 - Os seis perfis utilizados na análise, diferenciados levando em conta apenas a formação de topo, e sem associar formações distintas mas texturalmente semelhantes	374
Tabela 108 - Resultados da análise discriminante	374
Tabela 109 - Os cinco perfis litológicos utilizados na análise, diferenciados levando em conta apenas a formação de topo, e agregando formações distintas mas texturalmente semelhantes	375
Tabela 110 - Resultados da análise discriminante	376
Tabela 111 - Os quatro perfis utilizados na análise, diferenciados levando em conta todas as formações nos perfis das formas, e agregando formações semelhantes em termos da sua componente textural predominante	377
Tabela 112 - Resultados da análise discriminante usando os quatro perfis	377
Tabela 113 - Os três perfis utilizados na análise, diferenciados levando em conta apenas as formações no topo dos perfis das formas, e agregando formações semelhantes em termos da sua componente textural predominante	379
Tabela 114 - Resultados da análise discriminante usando os três perfis	379
Tabela 115 - Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov realizados a fim de aferir a normalidade dos 13 factores de controlo potenciais de natureza quantitativa	383
Tabela 116 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre pares de factores	383
Tabela 117 - Variância explicada por cada uma das 10 componentes principais (CP) definidas numa análise preliminar	385

Tabela 118 - Coeficientes de correlação linear (<i>loadings</i>) entre as 13 variáveis originais e as quatro componentes principais definidas	385
Tabela 119 - <i>Scores</i> dos 30 sistemas de ravinas em estudo face a cada uma das quatro CP selecionadas	386
Tabela 120 - Resultados da análise discriminante obtidos em relação à ocorrência de fragmentação por dessecação nas paredes e cabeceiras das formas	387
Tabela 121 - Resultados da aplicação do teste Qui-Quadrado à relação entre processos e contexto litológico, tanto na sua aproximação clássica como na aproximação baseada em simulação de Monte-Carlo	390
Tabela 122 - Evolução de 28 sistemas de ravinas em termos de área e volume durante o período 1970-2006	396

Resumo

O presente trabalho teve por objectivo geral contribuir para o conhecimento da erosão do solo por ravinamento e estruturou-se em três partes. A primeira consistiu numa revisão da literatura publicada, cujos resultados evidenciam o ravinamento como produto da combinação entre a acção do escoamento e a ocorrência de movimentos de massa ao longo do tempo, em contraste com a abordagem baseada em processos hídricos que tem vigorado. O enquadramento conceptual resultante forneceu sustentação teórica ao restante da investigação. Na segunda parte construiu-se uma perspectiva de conjunto sobre a incidência do fenómeno numa área de estudo abrangendo 2912 km² da margem esquerda da bacia do baixo Tejo. Foto-interpretção e validação de campo permitiram diferenciar oito grandes padrões de ravinamento e estabelecer um contraste claro entre os sectores N e S da área de estudo, respectivamente associados a sistemas de ravinas de dimensões decamétricas a hectométricas em rede e em complexo, e a formas relativamente incipientes de carácter linear. Salientou-se também a relevância das formas associadas a elementos antrópicos.

Na terceira parte do trabalho analisou-se em pormenor um dos grandes padrões referidos. Assumindo como área de estudo as bacias das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho (área total 151,3 km²), investigou-se a morfologia geral e a localização de um conjunto de 90 complexos de ravinas, bem como os respectivos factores de controlo. Centrou-se depois a análise num sub-conjunto de 30 formas, relacionando-se quantitativamente morfologia, processos evolutivos e potenciais factores, e investigando-se a evolução entre 1970 e 2006. Os resultados indicam o entalhe fluvial como o mais plausível factor de iniciação, mostrando controlos por parte da topografia antecedente sobre os pontos de iniciação das formas, e do escoamento proveniente de montante sobre o seu desenvolvimento. Estabeleceu-se uma sequência evolutiva geral em termos morfológicos e mostrou-se que as formas continuam em expansão, com a dinâmica actual assente em colapsos nas paredes e cabeceiras. Os resultados sugerem um importante controlo por parte dos movimentos de massa no desenvolvimento e diversificação morfológica dos complexos de ravinas, sublinhando o papel desempenhado pela dinâmica nas cabeceiras.

Palavras-Chave: Ravinamento; Padrões de Ravinamento; Factores de Ravinamento; Processos de Ravinamento; Erosão do Solo; Movimentos de Massa; Erosão Hídrica; Bacia do Baixo Tejo

Abstract

This work had the general objective of contributing to the current knowledge on gully erosion and is structured as three parts. The first one consisted of a review of the published literature. Its results show gullies and gully systems to be the result of the combination between concentrated flow and mass movements through time, in contrast to the water erosion-based approach most predominant in the field. The resulting conceptual framework provided the theoretical basis for all subsequent research. On the second part, a general perspective was sought over the incidence of gully erosion on a study area encompassing 2912 km² on the left margin of the lower Tagus basin. Foto-interpretation and field validation allowed the differentiation of eight major gully erosion patterns. These established a clear contrast between the N and S sectors of the study area, respectively associated to gully systems of decametric to hectometric dimensions organized in networks and complexes, and to relatively incipient features of linear configuration. Attention was also drawn to the relevance of gullies associated with anthropic features.

On the third part of the investigation, one of the major gully erosion patterns was subjected to detailed analysis. Selecting as study areas the basins of the Ulme and Vale do Casal Velho rivers (total area 151,3 km²), a set of 90 large gully complexes was firstly investigated with respect to general morphology, location and their respective control factors. Analysis was then centred on a subset of 30 features, quantitatively relating morphology, evolution processes and potential factors, and measuring evolution between 1970 and 2006.

Results indicate fluvial incision as the most likely initiation factor, showing controls by pre-erosion topography over the initiation sites of features and by upslope runoff over their development. A general morphologic evolution sequence was established, and it was shown that gully complexes are still expanding, with present evolution centring on collapses in walls and headcuts. Results suggest an important control by mass movements on the development and morphologic diversification of features, underlining the role played by headcut dynamics.

Keywords: Gully Erosion; Gully Erosion Patterns; Gully Erosion Factors; Gully Erosion Processes; Soil Erosion; Mass Movements; Water Erosion; Lower Tagus Basin

Introdução

Introdução

De todos os processos de erosão do solo, o ravinamento é aquele que possui uma maior variabilidade no que diz respeito à dimensão e configuração das formas resultantes e ao âmbito temporal de ocorrência. Embora seja geralmente considerado um tipo de erosão hídrica, as ravinas surgem e evoluem através de diferentes combinações entre o escoamento e os movimentos de massa, podendo a importância relativa de cada um destes mecanismos variar grandemente ao longo do tempo. As consequências morfogenéticas do fenómeno vão desde a formação de canais incipientes, eliminados anualmente durante as operações de lavoura, até alterações significativas na própria topografia, dando origem a áreas de coberto vegetal reduzido, densamente entalhadas pelo escoamento, e impróprias para qualquer utilização de carácter agrícola.

A evolução de uma ravina pode estender-se de forma descontínua ao longo de muitas centenas de anos e ser sujeita a fases marcadas por dinâmicas muito diferenciadas, nas quais uma variedade de factores de controlo se conjuga de diferentes maneiras. Esta complexidade contribui para que o fenómeno tenha sido alvo de pouca atenção relativamente a outros processos de erosão hídrica, designadamente a erosão laminar e em sulcos.

O surgimento de ravinas tem sido descrito com diferentes graus de associação a diferentes sub-processos e em variados contextos ambientais (e.g. climáticos, topográficos, pedológicos, litológicos, de uso do solo). Esta diversidade tem justificado propostas de diferentes classificações para estas formas, umas mais adaptadas a condições locais, outras de âmbito mais geral.

Adicionalmente, e apesar dos muitos trabalhos publicados, não foram ainda propostas definições de *ravina* ou de *ravinamento* capazes de abranger a variabilidade morfológica e processual descrita na literatura, condicionando inevitavelmente o enquadramento teórico com que o fenómeno é abordado, e portanto os resultados da actividade científica que lhe é dedicada.

O presente trabalho teve por objectivo geral contribuir para o conhecimento da erosão do solo por ravinamento, ainda relativamente pouco estudada em Portugal. Orientaram-no três objectivos específicos:

(1) Desenvolver um enquadramento teórico e conceptual para o fenómeno e para as formas resultantes coerente com a literatura publicada internacionalmente;

(2) Com base nos resultados de (1), diferenciar e caracterizar os grandes padrões apresentados pelo fenómeno ao longo de uma área relativamente extensa situada na margem esquerda da bacia portuguesa do Tejo, analisando as suas relações face a diferentes factores de controlo.

(3) Com base nos resultados de (2), caracterizar em pormenor as formas numa sub-área de estudo mais restrita, investigando não só as relações entre morfologia, processos, e factores de controlo de uma forma integrada, mas também a evolução ocorrida nas últimas décadas.

Os três capítulos em que o trabalho se estrutura refletem de perto os três objectivos acima enumerados. O primeiro assenta numa revisão relativamente extensa da literatura publicada, não só no que concerne ao fenómeno do ravinamento, mas também no respeitante aos sub-processos específicos que o compõem (erosão causada pelo escoamento superficial e movimentos de massa), bem como as respectivas interacções e factores de controlo. O resultado desta revisão foi um enquadramento conceptual considerado ajustado ao conhecimento actual sobre o surgimento e desenvolvimento de ravinas, constituindo este uma base para o restante da investigação. Realizou-se ainda uma revisão dos trabalhos dedicados ao fenómeno em Portugal até à data.

No segundo capítulo, procurou-se construir uma perspectiva de conjunto sobre a incidência do ravinamento na totalidade da área de estudo. Para isso, toda a área foi dividida em unidades, homogéneas face a um conjunto de factores gerais de controlo (definidos com base no Capítulo 1), e estas unidades foram caracterizadas quanto aos padrões de ocorrência do fenómeno. Recorreu-se a interpretação de ortofotos e a validação extensiva no campo em ordem a levar a cabo esta caracterização. Por fim, seleccionaram-se conjuntos de formas individuais com base nos padrões de ravinamento identificados, a fim de investigar em termos mais específicos a sua relação com os mesmos factores de controlo utilizados para dividir inicialmente a área de estudo.

O conhecimento obtido sobre os grandes padrões de ravinamento e a sua distribuição espacial permitiu depois seleccionar um destes padrões para uma análise de pormenor em função da severidade da degradação causada e do interesse geomorfológico das formas observadas. A investigação detalhada da distribuição espacial e das características destas formas, bem como dos respectivos factores de controlo e evolução nas últimas décadas, é alvo do terceiro capítulo do trabalho, centrado nas bacias hidrográficas de duas ribeiras nas proximidades da vila da Chamusca: as ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho.

Procurou-se, com a articulação entre os capítulos/objectivos 2 e 3, estabelecer duas visões ao mesmo tempo contrastantes e complementares sobre o fenómeno do ravinamento na área estudada: uma primeira de escala regional, espacialmente abrangente mas inevitavelmente

generalizada, e uma segunda visão, de pormenor, focada nos contextos espaciais onde as consequências do fenómeno se afiguram mais graves e o seu estudo mais prioritário.

I

A erosão do solo por ravinamento: um enquadramento teórico

I

A erosão do solo por ravinamento: um enquadramento teórico

1. Os conceitos de ravina e de ravinamento

O fenómeno do ravinamento constitui um objecto de estudo cuja autonomia está bem estabelecida dentro da erosão do solo. Os seus limites teóricos, porém, não são nítidos. Diferentes autores propõem que há um *continuum* entre canais resultantes de erosão hídrica (e.g. sulcos, ravinas e canais fluviais), e que qualquer diferenciação em classes será, em certa medida, subjectiva (Grissinger, 1996: 153; Poesen *et al.* 2003: 95, 2006: 518). Esta subjectividade está patente nas próprias definições presentes na literatura (Tabela 1). Os exemplos apresentados mostram que se por um lado as várias definições associam a forma à acção erosiva do escoamento concentrado, por outro cada uma lhe atribui diferentes propriedades, desde o comportamento hidrológico à morfologia, à posição topográfica, ou à relação com as actividades humanas.

Tal como a sua definição, a distinção entre estas formas e outros entalhes menores (sulcos) foi alvo de diferentes propostas, na sua maioria assentes em critérios morfométricos. Brice (1966), ref. por Poesen *et al.* (2003: 94) propôs uma largura mínima de 0,3 m e uma profundidade mínima de 0,6 m. Imeson e Kwaad (1980) definiram uma profundidade mínima de 0,5m. Zachar (1982: 54) favoreceu uma profundidade mínima de 0,3 m, e Hauge (1977) e depois Poesen (1993) uma área de secção crítica de 929 cm² (um pé quadrado).

Outro critério já proposto é a posição face à macrotopografia, assente numa pressuposta tendência das ravinas para ressurgirem no mesmo local após a sua eliminação (Grissinger, 1996: 155; Toy *et al.*, 2002: 61).

Apesar das diferentes propriedades associadas às definições, a análise da literatura torna claro que o condicionamento imposto às actividades agrícolas tem sido geralmente utilizado como critério para estabelecer a diferenciação mais básica entre ravinas (Toy *et al.*, 2002: 61-64; Poesen *et al.*, 2003: 92; 2006: 516; Brady e Weil, 2008: 751). Assim, definem-se *ravinas efémeras* como “pequenos canais entalhados pelo escoamento concentrado que podem ser facilmente eliminados pela lavoura normal (*normal tillage*), apenas para reaparecerem no mesmo local em função de episódios posteriores de escoamento” (Soil Science Society of America, 2001). Por oposição, as *ravinas permanentes*, também denominadas *clássicas*, correspondem a “canais profundos demais para poderem ser facilmente eliminados com

recurso a material de lavoura comum, com profundidades que variam tipicamente entre os 0,5 m e os 25 a 30 m” (op.cit.)¹.

Tabela 1 - Algumas definições de “ravina” na literatura publicada.

Definições de ravina	Autores
"canal de drenagem cuja largura e profundidade não permitem uma lavoura normal"	FAO (1965) ¹
"um canal de drenagem efêmero entalhado em depósitos sedimentares espessos ou rocha mãe"	Gregory e Walling (1973) ²
"um canal originado pelo escoamento concentrado, com uma profundidade mínima de 0,3 m, e que resulta na fragmentação da vertente"	Zachar (1982: 54)
"um canal relativamente fundo, instável e em processo de erosão, que se forma na cabeceira, lados ou fundo de um vale onde nenhum canal bem definido existia previamente"	Schumm <i>et al.</i> (1984) ³
"um canal resultante de incisão fluvial em materiais não consolidados, caracterizado por transmissão efêmera de escoamento, lados declivosos, e cabeceira fortemente declivosa ou vertical"	Ebisemiju e Ekiti (1989:307)
"um canal geralmente permanente, de secção em V e paredes laterais com um declive próximo do ângulo de estabilidade dos sedimentos não consolidados"	Bull e Kirkby (1997: 357)
“um canal erodido pelo fluxo concentrado mas intermitente de água, [que tem lugar] habitualmente durante e imediatamente após a ocorrência de chuvas intensas, sendo profundo o suficiente para interferir com a lavoura normal e não ser por ela eliminado”	<i>Soil Science Society of America</i> (2001)
"um canal de drenagem relativamente permanente, de paredes declivosas, e que regista escoamento efêmero em contextos de alimentação em precipitação"	Morgan (2005: 30)
"uma incisão ao longo de uma linha de drenagem que apresenta sinais claros de degradação, com uma cabeceira constituindo uma quebra bem definida no declive”	Hancock e Evans (2006: 2939)
"um canal profundo numa vertente, geralmente entalhado pelo escoamento, e frequentemente sem fluxo permanente"	Kirkby e Bracken (2009: 1841)

¹Cit. por Bocco (1991: 393)

²Cit. por Burkard e Kostachuk (1997: 902)

³Cit. por De Rose *et al.* (1998: 1045)

Apesar de uma ampla aceitação, este critério faz com que o limiar métrico entre formas efêmeras e permanentes varie no espaço e no tempo, de acordo com as variações na tecnologia disponível (Nachtergaele *et al.*, 2002a: 224). Ao mesmo tempo, torna a

¹ Esta diferenciação foi introduzida no início dos anos 1980 nos Estados Unidos da América para permitir incluir nas avaliações de erosão do solo as perdas resultantes do escoamento em canais de dimensões intermédias entre os sulcos (efêmeros e sem tendência a ressurgir no mesmo local) e as ravinas de dimensões mais significativas (Grissinger, 1996: 155).

classificação inutilizável em áreas com outros usos (e.g. florestal, pastagem), onde qualquer ravina será desde o início permanente (Wainwright e Thornes, 2004: 178). Por outro lado, as características específicas do solo agricultado, nomeadamente a ausência sazonal de vegetação ou de coerência entre os agregados, não são habituais num contexto natural², pelo que a diferenciação assente na lavoura adquire, de um ponto de vista pragmático, alguma pertinência. É no solo cultivado, particularmente susceptível à erosão, que estes entalhes assumem maior impacto económico.

A dicotomia permanente/efémera tem estado na base da individualização de dois grandes subtemas nos estudos do ravinamento: por um lado, o surgimento e a dinâmica de ravinas (efémeras), habitualmente em campos agrícolas, e o conjunto de mecanismos e factores associados, normalmente em escalas temporais relativamente curtas (e.g. episódios de precipitação, horas, dias ou meses) (Vandaele *et al.*, 1996; Vandekerckhove *et al.*, 1998, 2000a; Woodward, 1999; Nachtergaele *et al.*, 2001; Souchère *et al.*, 2003; Capra *et al.*, 2005); por outro lado, as características e dinâmicas temporais, em escalas que vão dos poucos anos até vários milénios, de formas permanentemente entalhadas (Burkard e Kostachuk, 1995, 1997; Boardman *et al.*, 2003; Dotterweich *et al.*, 2003; Gábris *et al.*, 2003; Stankoviansky, 2003; Vandekerckhove *et al.*, 2003; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2007; Bouchnak *et al.*, 2009; Panin *et al.*, 2009).

Em contraste com os critérios já enumerados para distinguir ravinas efémeras de permanentes e de entalhes menores, não há limites superiores definidos, havendo estudos a incidir sobre formas que abrangem vários hectares (e.g. De Rose *et al.*, 1998; Parkner *et al.*, 2006). Em Portugal, os termos *ravina* e *barranco* são frequentemente utilizados como equivalentes, embora tenha sido já proposta a utilização do primeiro para as formas de dimensões decimétricas a métricas, e do segundo para as formas maiores, com dimensões métricas a decamétricas (Ferreira, 2004: 208).

Em contraste com as muitas definições para as formas estudadas, a revisão da literatura permitiu encontrar uma única definição para o processo subjacente (Soil Science Society of America, 2001; Poesen *et al.*, 2006: 516; Brady e Weil, 2008: 936). O ravinamento é definido como "o processo erosivo pelo qual o escoamento se acumula em canais estreitos, de forma frequentemente recorrente e, em períodos curtos, remove o solo desta área estreita até profundidades consideráveis".

² Excepções são áreas afectadas por incêndios florestais, abrangidas por movimentos de massa, ou cuja vegetação foi condicionada pela carência de água e/ou propriedades químicas do solo (e.g. excesso de sais).

2. Consequências e relevância no contexto da erosão hídrica do solo

A formação de ravinas ocorre numa variedade de paisagens e condições climáticas. Esta abrangência está na origem de numerosas designações locais, de que são exemplos *dongas* na África meridional (Wells, 2004), *lavakas* em Madagáscar (Wells *et al.*, 1991), os *arroyos* entalhados em fundos de vale no Oeste dos Estados Unidos da América (Graf, 1979), *carcavas* em Espanha (Cerdá e Garcia-Fayos, 1994) ou *voçorocas* no Brasil (Bacellar *et al.*, 2005).

As consequências do fenómeno podem ser divididas em dois tipos, consoante têm expressão no próprio local da forma ou a jusante. Consequências no local incluem a perda do solo e a degradação da sua produtividade, bem como o condicionamento imposto ao tráfego e ao uso pelas mudanças na topografia (Poesen *et al.*, 2006: 524). Como exemplo deste condicionamento, Valentin *et al.* (2005: 136) descrevem o processo pelo qual a formação de ravinas ao longo de uma vertente determinou o padrão de afolhamento numa área de estudo no Sudeste Asiático (Laos). De um padrão inicial, com parcelas organizadas no sentido das curvas de nível, foi atingido um padrão final, perpendicular a estas, e associado a taxas de erosão de 7 ton/ha/ano por oposição às 5 ton/ha/ano iniciais³. Na mesma área, a dinâmica erosiva obriga as populações locais a levar a cabo medidas de remediação (enchimento dos canais com madeira e resíduos agrícolas), calculadas como representando 5% do tempo de trabalho dos agricultores. Este tipo de medida é comum a outras regiões do mundo (e.g. Espanha, cf. Martínez-Casasnovas *et al.*, 2003: 450; Bélgica, cf. Nachtergaele *et al.*, 2002a: 226). Nos casos em que o entalhe se aprofunda até atingir horizontes de permeabilidade relativamente elevada, a infiltração no fundo pode ser significativamente superior à das áreas entre ravinas, diminuindo a quantidade de água disponível a jusante. Esta situação agrava-se quando o canal é utilizado como depósito de lixo, potenciando a contaminação de aquíferos subjacentes (Poesen *et al.*, 2006: 524). Caso a vertente afectada possua uma toalha freática e esta seja atingida, o incremento na drenagem pode levar ao abaixamento do nível freático, reduzindo a quantidade de água no perfil do solo dos sectores entre ravinas (e.g. Costa e Bacellar, 2007: 235) e portanto disponível para culturas de sequeiro. Processo análogo pode ocorrer nos fundos de vale, onde a eficiência da irrigação é fortemente reduzida pela concentração do escoamento em canais entalhados (Avni, 2005: 185).

³ Estas taxas referem-se à erosão pelo escoamento não concentrado, resultantes apenas da reorganização das parcelas no sentido da vertente. A perda de solo associada especificamente às ravinas não é considerada.

Em campos agrícolas, as ravinas (efémeras) são habitualmente cobertas durante as operações de lavoura (i.e. menos de um ano após a sua formação). O escoamento concentrado remove subsequentemente a cobertura de solo recente, relativamente pouco coerente, aumentando a concavidade planar da vertente e promovendo a ocorrência de mais escoamento e erosão (Casalí *et al.*, 1999a: 70; Poesen *et al.*, 2006: 524).

Poesen *et al.* (2003: 115) referem que, em vários locais da Europa, o aterro de áreas fortemente dissecadas por ravinas levou à truncagem dos perfis do solo nas áreas entre os canais e ao preenchimento destes últimos com o material removido. Em função das perturbações da estrutura do solo, estas operações promovem o desenvolvimento rápido de novos entalhes, bem como de processos relacionados, como a tubulação e a ocorrência de movimentos de massa ao longo do canal (Poesen e Hooke, 1997: 175; Borselli *et al.*, 2006: 655).

As consequências a jusante relacionam-se com a quantidade de escoamento, sedimentos e solutos proveniente de montante. Por um lado, a acção erosiva das ravinas é uma fonte significativa de sedimentos. Por outro, estes entalhes aumentam a conectividade para o escoamento ao longo da vertente, e portanto para o material transportado e eventuais poluentes adsorvidos, promovendo o assoreamento e a eventual poluição de lagos e albufeiras (Wasson *et al.*, 2002: 644; Verstraeten *et al.*, 2006: 769), danos em propriedades devido ao fenómeno particular das inundações com água carregada de sedimentos (designadas *muddy floods*, e.g. Boardman *et al.*, 2006; Evrard *et al.*, 2007), e agravando as consequências das cheias (Poesen e Hooke, 1997: 182; Costa e Bacellar, 2007: 236).

Em suma, o fenómeno do ravinamento condiciona todo o conjunto de funções desempenhadas pelo solo (Boardman e Poesen, 2006: 480): produção de alimentos e de fibras vegetais, filtragem da água, ecológica, sustentação (de estruturas antrópicas), arquivo⁴, e herança para as gerações futuras. Em casos extremos, a degradação pode dar origem às chamadas *badlands*, das quais existem numerosos exemplos no Sul da Europa, vários deles na Península Ibérica (Grove e Rackham, 2001: 272; Gallart *et al.*, 2002)⁵.

A definição do contributo do ravinamento para as taxas de erosão medidas (i.e. face aos outros tipos de erosão hídrica frequentemente individualizados na literatura⁶) não é fácil. Como salientam Poesen *et al.* (2006: 516), este fenómeno ocorre frequentemente a escalas

⁴ Arquivo de artefactos, mas também testemunho de usos e ambientes passados.

⁵ Embora as *badlands* possam ser consequência directa da acção antrópica, não pode deixar de salientar-se o papel de factores como a dinâmica tectónica regional ou modificações no nível de base dos cursos de água como dinamizadores da sua formação (Mather, 2009: 18).

⁶ Inter-sulcos (i.e. laminar), em sulcos e por tubulação, cf. Bryan, 2000: 387; Boardman e Poesen, 2006: 482; Brady e Weil, 2008: 751.

espaciais que ultrapassam aquelas tradicionalmente utilizadas nos estudos da erosão, designadamente parcelas cultivadas e talhões experimentais, sendo, pela dimensão das formas, difícil de simular no laboratório. É habitualmente resultado de eventos climáticos de maior magnitude, e portanto menor frequência, do que aqueles associados a outros processos erosivos, sendo portanto menos fácil de estudar. Tem também sido alvo de menos tentativas de modelação do que os processos de erosão inter-sulcos e em sulcos, associados às escalas de análise acima referidas.

Apesar destas dificuldades, a análise da literatura no que diz respeito à importância relativa e absoluta deste processo permite salientar dois pontos essenciais:

a. *O ravinamento gera importantes quantidades de sedimentos em diferentes ambientes, e é frequentemente o processo erosivo dominante.*

Como exemplos, Poesen *et al.* (1996) estimaram um contributo de 80% para a perda anual de sedimentos numa área de estudo a Leste de Mértola, e de 83% noutra área no SE de Espanha (a Leste de Almeria). Wasson *et al.* (2000) estimaram em cerca de 80% a contribuição de ravinas para a quantidade de sedimento acumulada numa albufeira de grandes dimensões no NW da Austrália, acentuada pelo facto de estas formas se concentraram em menos de 10% da área de drenagem. Os dados apresentados por Oostwoud Wijdenes *et al.* (2000), com base numa área estimada em 866 ha no SE de Espanha, permitiram calcular em 59% a contribuição das ravinas activas para as perdas anuais de solo.

Contribuições menos importantes foram estimadas por Valcárcel *et al.* (2003: 212) no NW de Espanha (26,4%), e por Poesen *et al.* (1996: 257) na região central da Bélgica (44%). Muitos outros exemplos são revistos por Poesen *et al.* (2003: 97; 2006: 523) e Valentin *et al.* (2005: 135).

A importância relativa que o ravinamento adquire num dado local é função de diferentes factores. Em termos absolutos, o entalhe de canais aumenta com a intensidade e a duração dos eventos de precipitação. A sua importância *relativa*, porém, tende a diminuir com o aumento do período de retorno destes eventos, já que os mais extremos também levam a que a sulcagem registre taxas de erosão muito elevadas (Poesen *et al.*, 1996: 258).

O coberto vegetal pode controlar a importância relativa do ravinamento ao condicionar outros processos: Cerdan *et al.* (2002: 104) estudaram a importância de diferentes classes de erosão hídrica em associação a dois eventos de precipitação extremamente intensa na Normandia, observando que as ravinas efémeras originaram, respectivamente, 24% e 84% dos sedimentos resultantes do escoamento concentrado. Este contraste foi associado à variação sazonal da

vegetação, promovendo a sulcagem (com o solo lavrado), ou condicionando-a (quando o coberto é mais extenso).

A escala espacial de análise, como foi já referido, possui um papel fundamental na importância assumida pelo ravinamento, em função do controlo exercido pela área de drenagem sobre o volume de escoamento produzido. Poesen *et al.* (1996: 260) observaram numa vertente a existência de uma distância crítica para jusante a partir da qual as taxas de erosão resultantes de ravinas efémeras, anteriormente responsáveis por c. 33% dos sedimentos erodidos, passaram a representar c. 85%. Vanvallegghem *et al.* (2005a: 88) observaram na Bélgica que a produção específica de sedimentos (ton/ha/ano) aumenta com o tamanho das áreas consideradas. O seu valor situa-se tipicamente abaixo de 10 ton/ha/ano para áreas <1 ha. Porém, para áreas entre 1 e 10 ha, sobe até 20 ton/ha/ano caso se formem ravinas efémeras, e pode atingir 60 ton/ha/ano quando estas são particularmente profundas (> 0,8 m). Um padrão análogo foi descrito para Espanha (Poesen *et al.*, 2006: 527).

Para além dos factores relacionados com o escoamento superficial, a intensidade do ravinamento é influenciada pelos factores de controlo do outro processo que lhe está associado, designadamente os movimentos de massa que têm lugar nas paredes e cabeceiras das formas (e.g. raízes das plantas, cf. Gyssels *et al.*, 2005: 201).

As propriedades do rególito nos seus diferentes horizontes/camadas influenciam de forma fundamental os processos erosivos. Poesen *et al.* (1996: 259) associaram o peso do ravinamento efémero numa área de estudo nas proximidades de Mértola ao elevado conteúdo em fragmentos de rocha no solo superficial (em média 30% da massa total), reduzindo a erosão inter-sulcos e em sulcos, mas não necessariamente a produção do escoamento necessário para o entalhe de ravinas mais a jusante. Este efeito ocorre amplamente no Mediterrâneo, onde uma parte significativa dos solos tem um elevado conteúdo em fragmentos de rocha (Poesen e Hooke, 1997: 172; van Wesemael *et al.*, 2002: 131).

A partir do momento em que seja atingido pela incisão, um horizonte sub-superficial relativamente erodível promoverá o ravinamento. Um horizonte mais resistente (e.g. horizonte Bt⁷) terá o efeito oposto. Em nenhum dos casos serão afectados os processos de erosão hídrica restringidos à superfície topográfica (erosão inter-sulcos e sulcagem). A combinação entre um horizonte superficial permeável (e.g. depósito de material grosseiro) e um horizonte subjacente impermeável tende a reduzir a sulcagem e a erosão laminar; porém, a resultante concentração do escoamento infiltrado sobre o material impermeável promove os

⁷ As letras Bt são adoptadas em Pedologia para designar um horizonte subsuperficial apresentando acumulação de argilas silicatadas, tipicamente iluviadas a partir dos horizontes subjacentes.

movimentos de massa e a formação de vias preferenciais para o escoamento sob a superfície, denominadas tubos (*pipes*), cujo eventual colapso potencia a formação e crescimento de ravinas (e.g. Van Den Brink e Jungerius, 1983: 281; Seeger *et al.*, 2009: 427; Verachtert *et al.*, 2010: 346);

b. *Em termos absolutos, o ravinamento origina taxas de erosão muito variáveis, de acordo com a variabilidade da sua expressão em diferentes contextos geomórficos.*

As ravinas descritas na literatura ocorrem numa variedade de contextos ambientais. Dada a quantidade de variáveis que interagem na sua evolução, é natural que se verifique grande variabilidade em termos de dinâmica e taxas de erosão. Exemplos são 1,6 ton/ha/ano medidas no NW de Espanha por Valcárcel *et al.* (2003: 212) e 16,1 ton/ha/ano medidas em áreas de estudo próximas de Bragança por Vandekerckhove *et al.* (1998, ref. por Poesen *et al.*, 2003: 97), ambos os valores sendo referentes a ravinas efémeras. No que diz respeito a formas de maiores dimensões, Martínez-Casanovas *et al.* (2003: 451) estimaram uma taxa média de erosão de 576 ± 58 ton/ha/ano no sector de cabeceira de um sistema de ravinas no NE de Espanha. Thomas *et al.* (2004: 1000) estudaram o crescimento de uma só ravina na região centro dos Estados Unidos ao longo de 30 anos, calculando uma erosão anual média de 320 ton de material e um crescimento volumétrico de 9200 m³.

3. Tipologias e contextos espaciais

A variabilidade nas formas estudadas em diferentes locais tem motivado a definição de tipologias por diferentes autores. Algumas destas classificações assentam em critérios múltiplos, como é o caso dos três tipos definidos por De Ploey na Tunísia Central em função da forma da secção transversal, da quantidade de cabeceiras e dos processos de evolução (De Ploey, 1974: 179). Imeson e Kwaad (1980) basearam-se na literatura e em observações em Marrocos para definir quatro tipos em função da forma da secção transversal, posição topográfica, tipos de escoamento associados⁸, e natureza do rególito.

Outras classificações são essencialmente morfométricas, levando em conta a profundidade e a forma da secção transversal (plana, estreita, larga e redonda; Zachar, 1982: 54) ou a geometria hidráulica (Billy e Dramis, 2003). Outras ainda assentam em padrões evolutivos. Neste contexto, Leopold *et al.* (1964: 450) descreveram a noção de ravinas *descontínuas* e *contínuas*, pressupondo duas fases sucessivas de desenvolvimento, em que entalhes inicialmente

⁸ Superficial e/ou sub-superficial.

descontínuos ao longo de uma depressão topográfica evoluem para formar um só canal contínuo. Outra diferenciação, já referida, é aquela que assenta na capacidade do homem para eliminar as formas, distinguindo ravinas *efémeras* e *permanentes*.

Optou-se na presente revisão por diferenciar tipologias de ravina em função do contexto topográfico (Figura 1). A topografia, ao influenciar de forma determinante a quantidade de escoamento (superficial e sub-superficial) disponível para produzir efeitos geomórficos, a sua velocidade (i.e. erosividade), e as tensões a que o rególito é sujeito (e portanto a ocorrência de movimentos de massa) permite estabelecer um nível elementar de diferenciação, condicionando não só os contextos espaciais em que estas formas se iniciam, mas também dinâmicas evolutivas particulares.

As noções de *ravina de fundo* e *de vertente* foram inicialmente propostas por Ireland *et al.* (1939), cit. por Bocco (1991: 393). As primeiras (*valley-bottom gullies*) caracterizam-se por uma concentração do escoamento topograficamente definida, ocorrendo portanto em fundos de vale e concavidades planares em vertentes. Incluídos nesta classe estão os *arroyos* característicos do Oeste dos E.U.A., localizados tipicamente em fundos de vale relativamente planos (Goudie, 2004: 32).

As ravinas de vertente (*valley-side gullies*⁹) formam-se onde o escoamento se concentra localmente, por exemplo em áreas sobre-pastadas, sulcos resultantes da lavra, limites de propriedades ou caminhos de gado (e.g. Morgan e Mngomezulu, 2003). A concentração do fluxo não é determinada pela macro-topografia, mas sim pela presença de perturbações na forma da superfície e/ou por um aumento da erodibilidade do rególito.

Por fim, as ravinas de desnível (*bank gullies*) caracterizam-se pela pré-existência de um desnível na topografia, associado a um aumento da velocidade e do poder erosivo do escoamento superficial, à concentração e acção erosiva do escoamento sub-superficial, e à ocorrência de movimentos de massa. O colapso de tubos é frequentemente o evento iniciador de uma nova ravina deste tipo (vd. Figura 1, C, D e E). Exemplos de desníveis referidos na literatura são margens de cursos de água (Oostwoud Wijdenes *et al.*, 2000; Vandekerckhove *et al.*, 2000b; 2001), terraços abandonados (Harvey, 1982: 332; Lesschen *et al.*, 2008), ou paredes de ravinas pré-existentes (Donker e Damen, 1984; Desir *et al.*, 2009: 225) e de canais de drenagem artificiais (Casalí *et al.*, 1999b). Este tipo engloba o que Harvey e Gutiérrez-Elorza (2005) denominam “ravinas de indução basal” (*basally induced gullies*).

⁹ Também denominadas *midslope gullies* (e.g. Harvey e Gutiérrez-Elorza, 2005: 54). Optou-se por não utilizar esta designação, já que refere especificamente uma posição de meia-vertente, o que pode não se verificar.

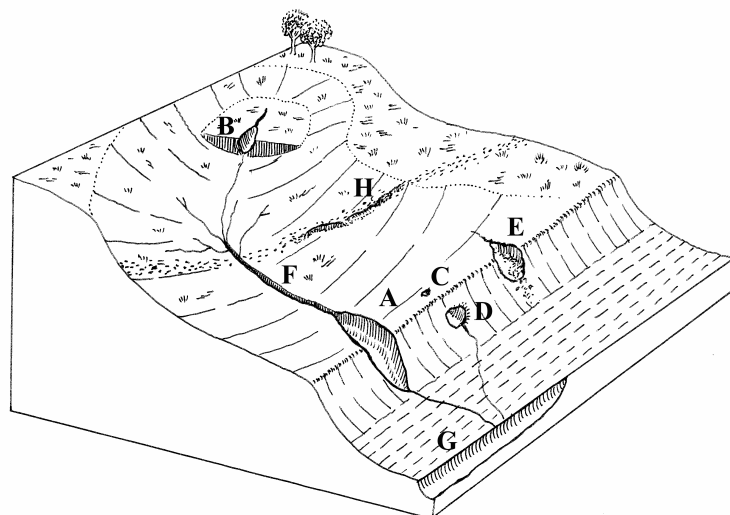


Figura 1 – Contextos topográficos do surgimento de ravinas. A- Ravina de desnível em margem de curso de água; B- Ravina de desnível em terraço; C- Entrada de tubo (*pipe*); D- Desembocadura de tubo; E- Ravina de desnível recém formada pelo colapso de um tubo. F- Ravina de fundo; G- Ravina de fundo do tipo *arroyo*; H- Ravina de vertente associada a um trilho de gado. Adaptado a partir de Wainwright e Thornes (2004: 179) e Poesen *et al.* (1996: 252; 2006: 517).

4. Mecanismos e processos de surgimento e evolução

Em cada um dos contextos topográficos acima enumerados, a formação e a evolução de ravinas ocorrem através de três diferentes mecanismos: (1) surgimento e posterior aprofundamento e extensão para jusante de um entalhe; (2) recuo da cabeceira para montante, (3) alargamento do canal. Por sua vez, estes mecanismos são conduzidos directamente por dois processos: o escoamento superficial, e os movimentos de massa. Cada um foi alvo de uma revisão bibliográfica, sendo o primeiro, pela quantidade de trabalhos de que tem sido tema, considerado aqui de forma bastante mais extensiva.

4.1. O escoamento superficial

A acção do escoamento assenta na oposição dinâmica entre a sua erosividade (i.e. capacidade para destacar e transportar material), e a erodibilidade do rególito¹⁰ (Bocco, 1991: 392; Wainwright e Thornes, 2004: 171), e é exercida fundamentalmente sobre a cabeceira e o

¹⁰ Optou-se por rególito em vez de solo, já que o material onde o escoamento tem lugar não possui necessariamente os atributos de um solo propriamente dito, designadamente a capacidade para sustentar crescimento vegetal (Brady e Weil, 2008: 947).

fundo dos canais¹¹. Optou-se no presente trabalho, por uma questão de clareza, por considerar em separado estes dois factores de erosão.

4.1.1. Erosividade

4.1.1.1. Parâmetros de erosividade

A capacidade do escoamento superficial para destacar e transportar sedimentos é controlada essencialmente pelo declive, a velocidade e a profundidade do fluxo e, no caso de este ser concentrado, pelas características geométricas do canal, como a secção ou o perímetro molhado. Estas variáveis podem ser combinadas em parâmetros compostos, dos quais existem vários exemplos na literatura.

A já referida tensão tangencial (Horton, 1945; Torri *et al.*, 1987, ref. por Slattery e Bryan, 1992: 128; Yao *et al.*, 2008) pode ser formalizada como

$$\tau = \rho.g.R.S = \gamma.R.S$$

em que ρ é a densidade da água ($g.cm^{-3}$), g é a aceleração devida à gravidade ($cm.s^{-2}$), R é o raio hidráulico¹², e S é o seno do ângulo de inclinação da superfície da água. O produto ρg equivale ao peso específico da água, γ . τ é expressa em Pa.

A partir do ponto em que $\tau \geq \tau_c$, sendo τ_c o limiar crítico de resistência oferecido pelas partículas da superfície, ocorrerá destacamento. A diferença $\tau - \tau_c$ é utilizada por Foster *et al.* (1995) para estimar a capacidade de destacamento¹³ de sedimentos dum fluxo canalizado, D_c ($Kg.m^{-2}.s^{-1}$):

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c)$$

em que K_r é um factor de erodibilidade do solo.

Outra variável utilizada para descrever a capacidade erosiva é a velocidade tangencial (*shear velocity*), formalizada como:

$$u_* = \sqrt{gRS} \quad (\text{Slattery e Bryan, 1992: 128})$$

¹¹ Embora o escoamento, tanto laminar como concentrado, possa também constituir um factor de alargamento das paredes de ravinas (e.g. Crouch e Blong, 1989; Vandekerckhove *et al.*, 2000b), a acção determinante dos movimentos de massa neste contexto faz com que lhe seja habitualmente dada pouca importância.

¹² O raio hidráulico é a razão entre a área de secção do canal e o seu perímetro molhado. Em situações em que a largura do canal é muito superior à sua profundidade, ou que não existe um canal formado, o raio hidráulico pode ser substituído pela profundidade média, A/w , em que A é o produto da profundidade pela largura, e w é a largura.

¹³ A capacidade de destacamento é definida como a taxa máxima a que o sedimento pode ser destacado de uma superfície para um dado conjunto de condições de fluxo e de solo (Toy *et al.*, 2002: 77).

Rauws e Govers (1988, ref. por Morgan, 2005: 28 e Bryan e Poesen, 1989: 219), definiram experimentalmente velocidades críticas de escoamento para o entalhe (u_{*crit} , $cm.s^{-1}$), em função da resistência tangencial¹⁴ do solo (τ_s , medida em condições de saturação com uma torvane), e em função da sua coesão (c' , em $N.m^{-2}$):

$$u_{*crit} = 0,90 + 0,30\tau_s$$

$$u_{*crit} = 0,89 + 0,56c'$$

Nearing *et al.* (1997), com base num conjunto de experiências que incluíram flumes laboratoriais de duas dimensões diferentes, parcelas experimentais, vários valores de declive entre 3 e 20 % e três tipos de solo, compararam diferentes parâmetros hidráulicos, propondo a potência de escoamento (*stream power*), expressa em $g.s^{-3}$, como o melhor predictor da quantidade de sedimentos transportada pelo fluxo. Este parâmetro é definido como a taxa de perda de energia potencial por unidade de área do canal (Leopold *et al.*, 1964: 178) e formalizado como:

$$\omega = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot S}{w}$$

sendo Q o caudal e w a largura do canal. Elliot e Laflen (1993, ref. por Govers *et al.*, 2007: 89) utilizaram-no para definir a capacidade de destacamento de sedimentos de um fluxo (D_c , em $Kg.m^{-2}.s^{-1}$) como:

$$D_c = K(\omega - \omega_c)$$

sendo, tal como definido por Foster *et al.* (1995) utilizando a tensão tangencial, ω a potência de escoamento, ω_c o valor crítico de ω equivalente à resistência oferecida pelo solo, e K um factor de erodibilidade.

Govers e Rauws (1986) utilizaram a potência unitária de escoamento (*unit stream power*) ($m.s^{-1}$), definida como a taxa de perda de energia potencial por unidade de peso do fluido por unidade de tempo, e que consiste no produto da velocidade do fluxo v pelo declive S .

$$\Phi = v \cdot S$$

¹⁴ A resistência tangencial do solo (τ) é uma medida da sua resistência à cedência sob uma força aplicada. É alvo de caracterização mais detalhada em 4.1.2.2.

Este parâmetro foi posteriormente adoptado por Morgan *et al.* (1998: 537) para descrever a capacidade de transporte¹⁵ em sulcos no modelo de erosão EUROSEM.

Além destes parâmetros, que pretendem descrever a força exercida pelo escoamento sobre uma superfície, existem dois outros que descrevem propriedades hidráulicas do fluxo com peso na sua acção erosiva. No entanto, estes últimos estão associados à dicotomia existência/inexistência de condições para o destacamento, e não a uma relação de correlação positiva com a força exercida pelo fluxo. O número de Froude (Fr) é formalizado como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gR}}$$

sendo um índice da ocorrência de ondas de gravidade no escoamento (Morgan, 2005: 21). Um valor de $Fr > 1$ denota um regime instável (dito *supercrítico*) e está associado à ocorrência deste fenómeno ondulatório passível de originar tensões tangenciais elevadas de forma localizada, sendo mais erosivo do que aquele associado a um valor de $Fr = 1$ (crítico) ou < 1 (sub-crítico ou tranquilo) (Bryan, 2000: 392). Fr foi definido por Savat (1979, ref. por Jones, 1987: 220) como o factor fundamental na iniciação de canais, e utilizado juntamente com a coesão aparente¹⁶ do solo (c' , medida em $N.m^{-2}$), por Savat e DePloey (1982: 123), estabelecendo os autores um limiar geral para a ocorrência de entalhe quando:

$$Fr > (1,2 + 0,0003.c')$$

Slattery e Bryan (1992: 136) observaram uma relação significativa entre concentração do escoamento em canais e valores supercríticos de Fr . No entanto, os resultados obtidos por estes autores não permitiram definir um limiar para o entalhe. Revelaram antes uma transição entre $Fr = 0,8$ e $1,3$ marcada pela ocorrência de ambos os tipos de escoamento, sendo este exclusivamente concentrado apenas acima de $Fr = 1,3$.

O segundo destes parâmetros é o número de Reynolds (Re), formalizado como:

$$Re = \frac{v.R}{V}$$

em que V é a viscosidade cinemática da água¹⁷. Re , expresso em $m^2.s^{-1}$, é um índice da turbulência verificada no fluxo. Com valores inferiores a 500, descreve um regime dito *laminar*, em que as várias camadas de água se movem paralelamente entre si com velocidade

¹⁵ A capacidade de transporte é a máxima quantidade de sedimentos que um fluxo pode transportar num dado momento, podendo ser expressa como uma concentração ($m^3.m^{-3}$) ou como uma taxa ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$).

¹⁶ O conceito de coesão aparente inclui, para além das ligações entre partículas individuais e agregados do solo, ou coesão efectiva (vd. Cap. 4.1.1.4.), a atracção adicional resultante da capilaridade em solos não saturados (Wood *et al.*, 2001: 41).

¹⁷ Quociente entre a viscosidade dinâmica e a densidade da água (ρ).

uniforme; valores superiores a 2000 indicam a existência de um regime *totalmente turbulento*, marcado pela ocorrência de turbilhões, velocidades diferenciadas na água em movimento, e movimentação de água entre camadas. Os valores intermédios estão associados a um regime de transição.

Os regimes turbulentos são caracterizados pela ocorrência periódica de pequenos fluxos localizados no tempo e no espaço (*bursts*), que sujeitam a superfície do solo a uma elevada tensão, podendo esta ser muito maior do que a tensão média exercida pelo escoamento nesse momento (Nearing, 1991: 82). Estes eventos estão directamente associados ao destacamento de partículas, já que a resistência tangencial do solo é da ordem dos *kPa*, enquanto as tensões médias exercidas pelo escoamento ao início do destacamento são apenas da ordem dos *Pa*. Slattery e Bryan (1992: 135), ao estudar a formação de sulcos num flume de laboratório, observaram a associação entre regimes turbulentos e de transição e a acção de entalhe por parte do fluxo¹⁸.

Embora estes vários parâmetros possam ser utilizados para definir condições críticas para a ocorrência de destacamento e (exceptuando *Fr* e *Re*) estimar a taxa máxima a que este pode ocorrer, a taxa a que um fluxo consegue destacar material num dado momento é condicionada pela carga já transportada. Como referem Toy *et al.* (2002: 70), a erosividade total de um fluxo divide-se entre o destacamento e o transporte, pelo que é a relação entre estes parâmetros a definir os dois contextos em que um fluxo pode ser condicionado na sua capacidade para destacar material (Figura 2). Quando a capacidade de transporte não foi ainda atingida, o escoamento diz-se limitado pelo destacamento. A sua capacidade para destacar material é limitada apenas pela resistência que o solo opõe (i.e. erodibilidade). Quando a capacidade de transporte está preenchida, diz-se limitado pelo transporte, e o destacamento é condicionado pela incapacidade do fluxo para transportar mais material.

¹⁸ Paralelamente à turbulência do fluxo, a ocorrência de erosão com tensões inferiores à resistência tangencial estimada para o solo é justificada pelo facto de as ligações entre as partículas no interface água-solo serem mais fracas do que aquelas que unem as partículas no interior do solo (consideradas na estimação da resistência tangencial), e por a força das ligações entre partículas não se distribuir homogeneamente, sendo aquelas mais fracamente ligadas as primeiras a serem erodidas (Knapen *et al.*, 2007: 95).

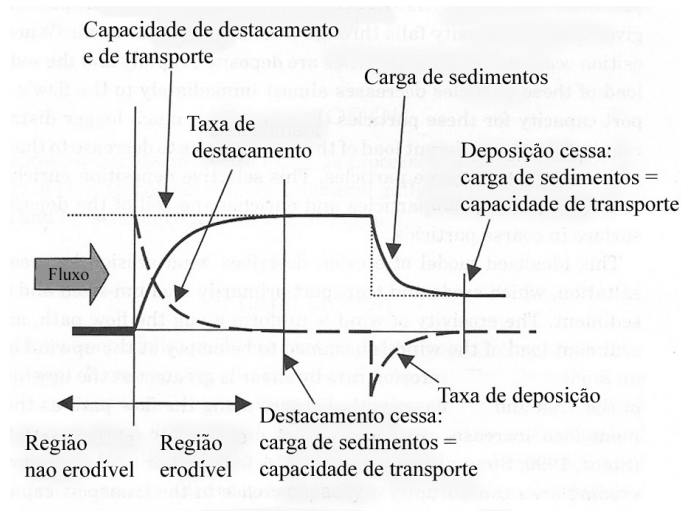


Figura 2 – Esquema simplificado das relações transporte/destacamento (adaptado de Toy *et al.*, 2002: 77). Notar a redução rápida na carga de sedimentos, associada por exemplo a uma diminuição no declive da superfície onde o escoamento tem lugar. Em simultâneo, a taxa de destacamento passa a revelar valores negativos (i.e. ocorre deposição), que depois tendem para zero à medida que um novo equilíbrio é atingido entre capacidade de transporte e carga sedimentar.

Nearing *et al.* (1989) e Foster *et al.* (1995) propuseram, no contexto do modelo de erosão WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) que, a partir do ponto em que o fluxo tem poder suficiente para o destacamento de material do solo, a carga de sedimentos aumentará, aproximando-se gradualmente da capacidade de transporte. O aumento na carga de sedimentos será acompanhado pela redução da taxa de destacamento, conforme a equação:

$$Df = D_c \left(1 - \frac{qs}{T_c}\right)$$

em que Df é a taxa de destacamento em $Kg.m^{-2}.s^{-1}$, e qs e T_c são a carga de sedimentos transportada e a capacidade de transporte, ambas em $Kg.m^{-1}.s^{-1}$. É assumida uma relação linear entre os dois casos extremos em que não há sedimento na água ($qs/T_c = 0$) e em que esta já atingiu a capacidade de transporte ($qs/T_c = 1$), sendo a taxa de destacamento nula neste caso. Conforme referem Nearing *et al.* (1990: 1703), esta relação inversa tem sido verificada por diferentes autores, embora a sua natureza linear não tenha sido experimentalmente comprovada.

Uma abordagem diferente foi adoptada por Morgan *et al.* (1998: 536), no modelo EUROSEM, em que a taxa de destacamento (D_r , em $m^3.s^{-1}.m^{-1}$) é calculada com recurso à largura do canal (w , em m), à velocidade de sedimentação (*settling velocity*) (v_s , em $m.s^{-1}$), e à diferença entre a

capacidade de transporte e a concentração actual de sedimentos no fluxo (TC e C , ambas em $m^3.m^{-3}$):

$$D_r = \beta . w . v_s . (TC - C)$$

O coeficiente β (adimensional) é um índice da eficiência do destacamento, representativo da erodibilidade do solo. TC e C são calculadas com base no poder unitário de escoamento (*unit stream power*), já descrito. Tal como na abordagem de Nearing *et al.* (1989) e Foster *et al.* (1995), quando $C = TC$, o destacamento é nulo.

O condicionamento do destacamento pelo transporte parte da noção de que o fluxo possui uma energia finita, podendo esta ser mobilizada para uma ou outra acção. Numa abordagem mais específica, Hairsine e Rose (1992 a, b, descritos por Merten *et al.* (2001: 862) e Govers *et al.* (2007: 91), entendem a ocorrência de destacamento (e, inversamente, deposição), como o balanço de três processos: mobilização de material a partir do leito, re-mobilização de material previamente depositado no leito, e deposição de material transportado. Embora esta abordagem seja diferente da de Nearing *et al.* (1989) e Foster *et al.* (1995), ambas produzem resultados semelhantes quando simulam a erosão num canal de declive e caudal constantes, na forma de uma diminuição exponencial da taxa de destacamento com o aumento da distância percorrida, à medida que a carga de sedimento transportada aumenta. Este padrão, porém, tem diferentes causas, já que no estágio final da abordagem de Hairsine e Rose a deposição contínua de sedimento ao longo do canal criou uma camada que protege o leito do destacamento, ao mesmo tempo que a taxa instantânea de deposição iguala a de re-mobilização (Merten *et al.*, 2001: 862). A mesma situação final é assim obtida sem a influência de um condicionamento imposto pela concentração de material na água.

A capacidade de transporte de um fluxo pode ser calculada com recurso a relações empíricas simples que variam consoante a dimensão das partículas transportadas (Govers 1990: 61), e que assentam nas mesmas variáveis associadas ao destacamento: declive, velocidade, profundidade e geometria do canal¹⁹ (Giménez e Govers, 2002: 1475). A título de exemplo, Morgan *et al.* (1998: 537) utilizaram a potência unitária de escoamento para calcular a capacidade de transporte (TC , $m^3.m^{-3}$) em sulcos, de acordo com os resultados obtidos por Govers (1990), com a fórmula

$$TC = c(\omega - \omega_{cr})^n,$$

¹⁹ O facto de o transporte depender do mesmo conjunto de variáveis que o destacamento não implica que estas variáveis se conjuguem de igual forma num e noutro processo. Esta diferenciação será referida mais à frente.

em que ω e ω_{cr} são, respectivamente a potência unitária actual e um valor crítico empiricamente determinado e c , η são uma função do diâmetro mediano das partículas transportadas.

Num contexto de variação significativa nos factores que lhe estão na base (e.g. quando o canal atravessa uma secção basal côncava na vertente, diminuindo o gradiente e a velocidade), a capacidade de transporte pode tornar-se inferior à carga transportada, sendo a deposição resultante uma função desta diferença, da velocidade de deposição das partículas transportadas e da velocidade do fluxo (vd. Figura 2). Esta relação é representada por Foster *et al.* (1995) como

$$Df = \frac{\beta \cdot v_f}{q} (T_c - qs)$$

em que Df é a taxa de deposição ($Kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$), q é o caudal unitário (*caudal/largura do fluxo*, em $m^2 \cdot s^{-1}$), v_f é a velocidade de deposição das partículas transportadas ($m \cdot s^{-1}$) e β é um coeficiente que representa a turbulência resultante do impacto da precipitação, com um valor de 0.5²⁰.

Embora, como já foi referido, a existência desta relação esteja empiricamente verificada, a causa exacta pela qual o aumento da concentração de sedimentos diminui o poder para destacar material não é bem conhecida. De acordo com as experiências realizadas por Merten *et al.* (2001: 862), uma hipótese razoável prende-se com o efeito do sedimento transportado em suspensão na redução da velocidade, e portanto da turbulência gerada no fluxo. Esta é uma condição essencial para a ocorrência de destacamento, na forma dos eventos localizados de alta intensidade (*bursts*) que geram a força necessária para ultrapassar a resistência do solo (Nearing, 1991); uma maior carga transportada em suspensão implicará assim condições menos propícias à erosão. Outra hipótese prende-se com a acção protectora exercida sobre o leito pelos sedimentos mais grosseiros, transportados por rolamento (*bed load*). Ambos os processos foram experimentalmente observados por Merten *et al.* (2001: 868), embora a acção protectora da carga transportada por rolamento tenha aparentado ter um impacto superior.

Os resultados experimentais actualmente disponíveis são ambíguos quanto à natureza da interacção destacamento/transporte (Govers *et al.*, 2007: 95). Giménez e Govers (2002: 1479) concluíram, com base na simulação da formação de sulcos num flume de 4,3 m, que não há

²⁰ O valor de β implica que o impacto da precipitação reduz a taxa de deposição, aumentando a concentração de sedimentos no fluxo para as mesmas condições hidráulicas. A influência da precipitação é considerada mais à frente.

uma diminuição sistemática da capacidade de destacamento de montante para jusante. Ao mesmo tempo, observaram que a relação exacta entre transporte e destacamento depende da rugosidade do leito (considerada à frente), sendo os dois processos mais adequadamente descritos por parâmetros diferentes (op.cit.: 1471). Merten *et al.* (2001:865), por outro lado, concluíram experimentalmente que a relação entre ambos os processos é válida, embora os seus resultados tenham sido inesperados: ao simularem a dinâmica de destacamento e deposição num sulco de largura constante sujeito a um fluxo com diferentes concentrações iniciais de sedimentos em suspensão, observaram invariavelmente uma área de destacamento a montante, mesmo tendo sido já excedida a capacidade de transporte. Num contraste semelhante, Kamalu (1993), ref. por Morgan (2005: 24) observou experimentalmente que a taxa de destacamento se manteve sempre no seu valor máximo (i.e. equivalente à capacidade de destacamento) até a capacidade de transporte ser atingida, cessando apenas a partir dessa altura.

4.1.1.2. Factores de erosividade: precipitação

A precipitação exerce controlo sobre a erosividade do escoamento de três formas, que tendem a ocorrer em associação e cuja separação prática é difícil. Em primeiro lugar, a energia do impacto das gotas²¹ que caem directamente sobre o fluxo aumenta a sua turbulência e a sua profundidade, diminuindo a sua velocidade e portanto a sua capacidade de exercer tensão sobre a superfície (Moss *et al.*, 1982: 411; Slattery e Bryan, 1992: 136), embora aumente ao mesmo tempo a sua capacidade de transporte (Morgan, 2005: 25 e 29). Moss *et al.* (1979, refs. por Moss *et al.*, 1982: 411) observaram experimentalmente, com recurso a precipitação artificial, uma dinâmica de competição entre dois mecanismos de transporte: por um lado, aquele associado ao fluxo não concentrado, cuja velocidade é reduzida pela turbulência causada pelo impacto das gotas, e que contribui para a manutenção de um leito aplanado e regular. Este mecanismo mostrou-se dominante em declives suaves. Por outro, aquele associado à concentração do escoamento, e portanto a uma velocidade e poder erosivo superiores, conducentes à formação de canais, e associado a declives elevados. Em declives intermédios, quanto maior a proporção do escoamento fornecido como precipitação, maior o comprimento da vertente necessário para a concentração deste ocorrer. Estes resultados estão

²¹ A energia cinética associada ao impacto da precipitação é função de vários parâmetros: intensidade e duração do episódio, e massa, diâmetro e velocidade das gotas. Em função da complexidade das relações entre elas, têm sido frequentemente utilizadas fórmulas que estimam a energia libertada ($Mj.ha^{-1}.mm^{-1}$), como uma função da intensidade da precipitação ($mm.h^{-1}$) (Morgan, 2005: 46).

de acordo com aqueles obtidos por Savat (1977: 139), que observou a diminuição do efeito da precipitação com o aumento do declive.

Uma segunda forma de influência da precipitação está associada ao seu efeito de destacamento a montante de um canal em consideração: quanto mais erosivo o evento chuvoso, maior a carga transportada pelo fluxo à entrada do canal, e portanto menor a capacidade do escoamento concentrado para destacar novo material.

A terceira forma de influência manifesta-se quando a fragmentação dos agregados do solo resultante do impacto das gotas é acompanhada da formação de um selo superficial, condicionando a infiltração e aumentando a erosividade do escoamento. O processo de selagem do solo é considerado em detalhe mais à frente (vd. 4.1.1.4).

Como já foi referido, a ocorrência destes três mecanismos (influência nas propriedades hidráulicas do fluxo, na quantidade de material transportado e na magnitude do fluxo) é difícil de separar durante um evento real de precipitação, sendo melhor conceptualizada numa sequência temporal hipotética. Com o início do episódio chuvoso, o solo é submetido à acção directa das gotas, desagregando mecanicamente os materiais e projectando-os em redor do ponto de impacto (Shainberg e Levy, 1996a: 3; Morgan, 2005: 17). Este é o denominado *splash*. A acção das gotas pode conjugar-se com as propriedades do solo para determinar a formação de um selo superficial.

Com a saturação dos primeiros milímetros do perfil do solo e a redução da taxa de infiltração, começa a acumular-se água nas depressões microtopográficas na forma de poças, começando eventualmente a verificar-se escoamento. A partir de uma profundidade crítica, que varia de autor para autor entre o diâmetro das gotas em queda e um quinto desse valor²² (Morgan, 2005: 19), a água irá dissipar a força causada pelo impacto, reduzindo o destacamento resultante do *splash* de forma exponencial (Wainwright e Thornes, 2004: 176)²³. Neste escoamento incipiente, a precipitação aumenta a profundidade e a turbulência do fluxo (Moss *et al.*, 1982: 411; Slattery e Bryan, 1992: 136), e a sua resistência hidráulica (i.e. rugosidade, Gilley *et al.*, 1992:25; Li, 2009) contribuindo para diminuir a sua velocidade. Esta desaceleração contraria a promoção do destacamento e da canalização do fluxo associada à turbulência, cujo papel só se manifestará plenamente em condições de escoamento mais rápido (e.g. com raio hidráulico superior, declive mais acentuado ou menor rugosidade).

²² Esta variação deve-se às diferentes condições experimentais, e em particular às diferentes classes texturais de solo utilizadas.

²³ Embora não tenham sido encontradas referências à diminuição da influência da precipitação sobre as propriedades hidráulicas do fluxo com o aumento da profundidade deste, é inevitável que tal aconteça, já que a camada de água afectada pelo impacto das gotas se torna relativamente menor.

4.1.1.3. Factores de erosividade: rugosidade hidráulica

A rugosidade hidráulica é uma propriedade do meio onde o escoamento toma lugar, exercendo uma influência directa sobre a sua capacidade erosiva.

Para além da resistência oposta ao escoamento pelo solo, a resistência total oposta ao fluxo inclui as forças associadas às irregularidades na própria forma da superfície onde este ocorre, e a todos os elementos de diferentes dimensões que nela possam estar presentes (e.g. fragmentos de rocha de diferentes dimensões, vegetação), bem como a força resultante do impacto da precipitação. Estes valores são habitualmente considerados de forma cumulativa, sendo a rugosidade hidráulica total o somatório de todos eles (e.g. Abrahams *et al.*, 1992; Gilley *et al.*, 1992).

O facto de a rugosidade total incluir a acção de diferentes elementos implica que a força efectivamente disponível para destacar e transportar sedimentos é apenas uma parcela da força total do fluxo, já que frequentemente a maior parte desta é dissipada nos outros elementos para além das partículas do solo (Giménez e Govers, 2002: 1475).

A rugosidade é habitualmente quantificada com recurso a dois parâmetros: o coeficiente n de Manning, e o coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach.

A equação de Manning permite calcular a velocidade média de um fluxo²⁴ (v , em $m.s^{-1}$) conhecendo a geometria do canal:

$$v = \frac{R^{2/3} s^{1/2}}{n}$$

sendo R o raio hidráulico (m) e s o declive ($m.m^{-1}$). O denominador n é um parâmetro que descreve a resistência exercida pelo leito, e cujos valores, determinados experimentalmente, variam entre 0,01 (superfícies lisas de metal) e 0,06 (canais naturais com muitas rochas, protuberâncias, ou traçado irregular) (Leopold *et al.*, 1964: 158).

O coeficiente de Darcy-Weisbach (adimensional) é calculado de acordo com o formalismo

$$f = \frac{8gds}{v^2}$$

em que g é a aceleração gravitacional ($m.s^{-2}$), d é a profundidade média do canal, s é o seno do ângulo de declive e v é a velocidade ($m.s^{-1}$).

O aumento do efeito da rugosidade tem como consequência a redução da velocidade do fluxo (Giménez e Govers, 2002: 1481), e portanto uma diminuição da sua capacidade erosiva. Esta relação está na base do fenómeno observado experimentalmente por Govers (1992): em

²⁴ A equação pressupõe escoamento turbulento.

sulcos formados em materiais sem coesão e com um perfil homogêneo em profundidade, a velocidade é independente do declive. Este fenómeno foi associado a dois factores de causa: o facto de os sulcos possuírem caracteristicamente leitos rugosos e a influência do declive tender a ser inferior nestas condições; e a ocorrência de retroacção negativa entre o efeito do declive e a morfologia do leito (um declive superior originará maior velocidade e erosão, promovendo o aumento da rugosidade do leito, o que resulta por sua vez numa redução da velocidade). Esta retroacção, de acordo com o autor, condiciona a aplicabilidade da fórmula de Manning a sulcos, apesar da sua largamente aceite adequação ao cálculo da velocidade em canais num contexto de engenharia (Leopold *et al.*, 1964: 158) e ao comportamento hidráulico de rios, e a sua utilização em modelos de erosão (e.g. Morgan *et al.*, 1998: 533)²⁵. Em trabalhos baseados em simulações laboratoriais, a rugosidade divide-se frequentemente em dois elementos: as partículas do solo, e a forma do leito. Utilizando como parâmetro exemplificativo a tensão tangencial²⁶, a força exercida pelo fluxo pode ser dividida de forma análoga (Govers e Rauws, 1986), sendo

$$\tau = \tau' + \tau''$$

em que τ é a tensão tangencial total exercida pelo escoamento no canal, e τ' e τ'' , respectivamente, as parcelas desta associadas às partículas e à forma do leito.

Govers e Rauws (1986) observaram que, num leito regular, a capacidade de transporte de sedimentos está claramente correlacionada com a velocidade tangencial do fluxo ($u_* = \sqrt{gRs}$), não se verificando, porém, essa relação num leito irregular. Calcularam assim a componente da velocidade tangencial associada exclusivamente às partículas do solo (u'_*), obtendo uma relação mais satisfatória. Num leito regular, u_* é equivalente a u'_* , sendo a velocidade tangencial total a mesma que é exercida sobre as partículas; porém, num leito irregular, uma parte de u_* é dissipada na rugosidade resultante da forma, pelo que $u_* > u'_*$, e a correlação entre ambas as variáveis não é tão elevada.

Giménez e Govers (2002) concluíram, com base em experiências laboratoriais, que o transporte de sedimentos e o seu destacamento são mais adequadamente representados por parâmetros diferentes: o transporte, pela tensão tangencial associada às partículas (*grain shear stress*, τ') ou pela potência unitária de escoamento (Φ), e o destacamento pela força

²⁵ Para além da evolução morfológica em escalas temporais muito curtas, os sulcos distinguem-se dos rios pela importância da rugosidade do leito. Num sulco, a profundidade típica do fluxo varia entre poucos mm e vários cms, ao passo que num rio é muito superior à altura dos elementos de rugosidade. Estas diferenças colocam em questão a compatibilidade das abordagens entre um e outro contexto (Govers *et al.*, 2007: 88).

²⁶ Qualquer um dos parâmetros que descrevem a força do escoamento, acima descritos, pode ser dividido desta forma.

tangencial unitária (*unit length shear force*, Γ ²⁷) ou pela tensão tangencial (τ). Esta diferenciação resulta do facto de as relações transporte-destacamento serem controladas pela rugosidade do canal (op.cit: 1481). Com efeito, a rugosidade que caracteriza o leito dos sulcos, na forma de quebras no declive (*knickpoints*) (Slattery e Bryan, 1992; Govers, 1992: 524; Govers *et al.*, 2007: 88) não contribui para o transporte de sedimentos. A capacidade de transporte do fluxo estará portanto mais relacionada com a porção da força deste que resta para ser exercida sobre os sedimentos após esta rugosidade ser vencida. Por outro lado, as irregularidades contribuem para o destacamento, já que é nas quebras no declive que se produzem os aumentos localizados de velocidade, as condições supercríticas e a turbulência associadas à evolução típica destes canais (i.e. o recuo das cabeceiras e das quebras no declive para montante, cf. Toy *et al.*, 2002: 89; Morgan, 2005: 29). Assim, e de acordo com Giménez e Govers (2002), a resistência oferecida pela rugosidade implica que o destacamento e o transporte de sedimentos não podem ser descritos pelo mesmo parâmetro, tal como tem ocorrido na modelação de processos erosivos (e.g. Foster *et al.*, 1995).

A rugosidade da superfície em que o escoamento canalizado toma lugar exerce um papel muito importante na acção erosiva deste desde o próprio fenómeno da sua concentração e, anteriormente, na própria geração de escoamento não concentrado²⁸. No contexto natural da vertente, o escoamento não concentrado à superfície raramente ocorre na forma de uma toalha homogénea de água, manifestando-se quase sempre na forma de um padrão irregular de pequenos fios de água sem canais definidos, determinados pela micro-topografia do terreno e pela vegetação (Morgan, 2005: 21). Neste padrão desigual, a velocidade e a profundidade podem variar significativamente em pequenas extensões de terreno, podendo o fluxo ser laminar, de transição, totalmente turbulento ou dividir-se em manchas de cada um destes três estados (Abrahams *et al.*, 1992: 2). Nas depressões e nas quebras no declive, o escoamento aumentará naturalmente a velocidade, exercendo localmente tensões relativamente elevadas sobre o solo (Jones, 1987: 221). Relativamente à vegetação e a fragmentos de rocha ou outros detritos, a pressão exercida pelo fluxo é superior a montante do que a jusante, onde se originam vórtices e turbulência (Bunte e Poesen, 1993, ref. por Nearing *et al.*, 1997: 866; Morgan, 2005: 63). A partir de um valor crítico de tensão, que será tendencialmente atingido

²⁷ Formalizado como $\Gamma = \rho g A S$, em que A é a área de secção molhada do canal.

²⁸ As irregularidades originam a retenção da precipitação à superfície, promovendo a infiltração e retardando e diminuindo o volume de escoamento superficial produzido. Ao mesmo tempo, a sua maior área específica de superfície ($m^2.m^{-3}$) reduz a energia de impacto da precipitação por unidade de área do solo, o que, juntamente com a maior estabilidade dos agregados de maiores dimensões (torrões), leva a uma menor tendência para a formação de selos superficiais, contribuindo igualmente para a infiltração (Gómez e Nearing, 2005: 261)

antes em qualquer um destes contextos do que na superfície envolvente, haverá condições para o entalhe, havendo portanto condições para a concentração do fluxo. Gómez e Nearing (2005) estudaram experimentalmente a produção de escoamento e sedimentos num flume, comparando os resultados obtidos numa superfície regular e noutra irregular. Com um declive de 5%, observaram uma maior produção de sedimentos na superfície irregular, associada em parte à concentração resultante da circulação em torno dos elementos da rugosidade do solo²⁹. Moss *et al.* (1982: 406) simularam a formação de canais incipientes num flume de pequenas dimensões, observando o surgimento de entalhes numa superfície irregular com caudais significativamente inferiores àqueles necessários para a obtenção do mesmo resultado num leito regular. Como estes autores demonstraram, a rugosidade, seja resultante da forma do leito ou da presença de objectos, diminui os limiares de velocidade necessários para o entalhe. Conforme Knapen *et al.* (2007: 95), e tal como os já referidos *bursts* associados ao fluxo turbulento (cf. Nearing, 1991: 82) as concentrações locais de escoamento causadas pela rugosidade permitem que ocorra erosão com fluxos cuja tensão exercida é estimada como sendo da ordem dos Pa, quando a resistência tangencial estimada para o solo é da ordem dos Kpa³⁰.

Além da altura total dos elementos de rugosidade, a sua densidade e as modificações desta com a altura também exercem controlo sobre a acção erosiva do fluxo. Poesen (1992: 275) descreveu o aumento da erosividade com a concentração de fragmentos de rocha parcialmente integrados no solo, através da concentração e aceleração do escoamento nos espaços entre fragmentos. Thornes (1980: 138) descreve diferentes relações entre a rugosidade e a altura do fluxo para duas colheitas (centeio e sorgo), podendo esta relação variar de forma directa (sorgo) ou inversa (centeio), em função das variações na forma das plantas.

4.1.1.4. Factores de erosividade: infiltração

Durante um episódio de fornecimento em água, a possibilidade de que se origine escoamento à superfície é grandemente controlada pela taxa a que a água se infiltra no solo. Esta taxa depende de vários factores: a humidade previamente contida no solo, e a capacidade deste para transmitir água (Davie, 2008: 58), por sua vez função da sua textura e estrutura, conteúdo em fragmentos de rocha, teor de matéria orgânica, e estabilidade dos agregados. Cada um destes factores foi alvo de consideração em separado.

²⁹ Os autores também associaram os resultados a um escoamento mais abundante, resultado da formação de selos deposicionais nas depressões da rugosidade, e da conseqüente diminuição da infiltração. A selagem é considerada no capítulo seguinte.

³⁰ O cálculo da tensão tangencial de um fluxo assume que este se distribui uniformemente no leito.

Humidade antecedente do solo

Durante um episódio de precipitação, a taxa de infiltração tende a ser maior inicialmente, à medida que a água se escoia gravitacionalmente pelos poros de maiores dimensões, e por capilaridade na porosidade mais fina (Costa, 2004: 416). À medida que o teor em humidade aumenta, assim ocorre também com a espessura da película de água em torno das partículas do solo, diminuindo a atracção destas para novas moléculas de água com o aumento da distância que as separa e, conseqüentemente, os gradientes de potencial capilar e a velocidade do movimento da água por capilaridade. Ao mesmo tempo, uma parte dos poros maiores fica preenchida, diminuindo a quantidade de água que se infiltra gravitacionalmente, e tornando mais lenta a expansão da frente de humedecimento (i.e. descontinuidade entre o solo já humedecido e ainda não humedecido). A resultante evolução da taxa de infiltração é representada pela denominada curva de Philip³¹ (Fig.3), e mostra que esta tende com o tempo para um valor constante, correspondente à taxa que o solo pode manter de forma sustentada estando saturado em água, e denominado capacidade final de infiltração, ou taxa terminal de infiltração³². Ao mesmo, a curva torna claro que, quanto maior for o conteúdo antecedente em humidade no solo, menor será a taxa de alimentação em água (e.g. precipitação, irrigação) necessária para produzir escoamento erosivo.

Para além da influência directa, o teor em água do solo exerce ainda uma influência indirecta sobre a infiltração através do seu controlo sobre a estabilidade dos agregados do solo, considerada mais à frente.

³¹ A denominação refere-se ao trabalho realizado por J.R.Philip, citado em Davie (2008: 60).

³² Para além do aumento do teor em água, razões para a diminuição da infiltração são o aumento da distância à superfície, que torna mais demorado o percurso da água até à frente de humedecimento (Davie, 2008) e a resistência oferecida pelo ar eventualmente presente nos espaços intersticiais do solo, comprimido pela água em progressão (Costa, 2004: 417). Este ar comprimido é, de acordo com Morgan (2005: 14), a razão pela qual a taxa terminal de infiltração é na prática frequentemente inferior à condutividade hidráulica saturada do solo, quando em teoria ambas deveriam ser equivalentes.

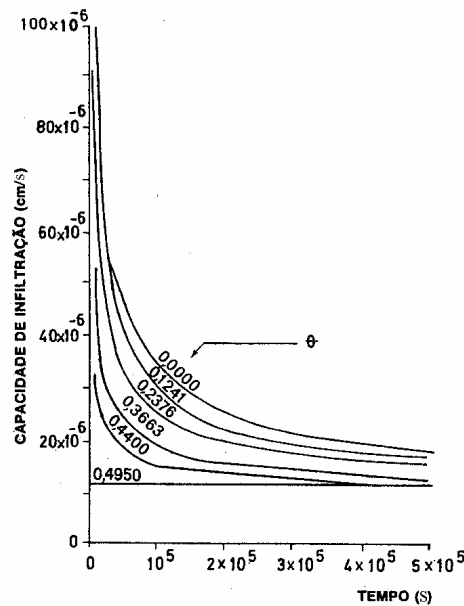


Figura 3 - Curva de Philip. Extraída de Lencastre e Franco (1992; 181). θ é o conteúdo volumétrico de água no solo (razão entre o volume ocupado pela água e o volume total da amostra de solo).

Porosidade, textura e estrutura do solo

A capacidade do solo para transmitir água é fortemente influenciada pela dimensão dos poros e pelo seu arranjo face à estrutura do solo³³. A taxa terminal de infiltração pode, assim, variar desde mais de 200 mm/h para solos de textura grosseira (e.g. arenosos) até menos de 5 mm/h para solos argilosos (Morgan, 2005: 14).

A macro-porosidade³⁴, em particular, pode justificar taxas finais de infiltração relativamente elevadas em solos de textura fina ao transmitir grandes quantidades de água. A título de exemplo, Childs *et al.* (1957) e Youngs (1964), ambos referidos por Thornes (1980: 132), observaram, respectivamente, que a macro-porosidade pode aumentar a permeabilidade de um solo argiloso até ao nível da de um solo de gravilha³⁵, e que a actividade desenvolvida por anelídeos pode aumentá-la até ao nível da de um solo de areias grosseiras³⁶.

É no contexto da macro-porosidade que a estrutura do solo adquire importância em desfavor da sua textura, já que os macro-poros definidos entre os agregados do solo e no seu interior

³³ Num solo bem estruturado, existirão poros com uma gama variada de dimensões, tanto em torno dos agregados como no seu interior (i.e. porosidade estrutural). O mesmo não acontecerá, por exemplo, num solo compactado, cuja modificação estrutural promove poros de reduzidas dimensões (i.e. porosidade textural).

³⁴ Os macroporos são definidos por um diâmetro mínimo que varia amplamente de autor para autor, podendo ser superior a 60 μ m (Brady e Weil, 2008: 939), 30 μ m (Davie, 2008: 59), 250 μ m (Bryan, 2000: 400) ou situar-se entre os 50 e os 100 μ m (Costa, 2004: 292).

³⁵ O autor não define os limites de diâmetro característicos da gravilha. Brady e Weil (2008: 128) definem esta classe como podendo incluir sedimentos cujo maior diâmetro varia entre 2mm e 75mm.

³⁶ O autor não refere qual o diâmetro mínimo considerado com relação à macro-porosidade.

(i.e. porosidade estrutural) podem favorecer taxas de infiltração mais elevadas do que aquelas associadas à sua porosidade textural.

Para além dos já referidos anelídeos, toda a fauna do solo que escava túneis pode exercer maior ou menor controlo sobre a porosidade, e.g. toupeiras, ratos, térmitas e formigas (Brady e Weil, 2008: 451; Blanco e Lal, 2008: 432). No caso da vegetação, o crescimento das raízes mais finas (diâmetro inferior a 1mm) contribui para a formação de uma rede contínua de macro-poros, diminuindo a densidade aparente do solo e aumentando a sua capacidade de infiltração (Gyssels e Poesen, 2003: 377; Gyssels *et al.*, 2005: 195). De forma inversa, as raízes com diâmetros superiores podem aumentar a densidade do solo numa espessura envolvente de até 8 mm (op.cit., 2005: 195).

Em solos saturados, a quase totalidade do escoamento ocorre através dos poros de maiores dimensões (Brady e Weil 2008: 193), pelo que a condutividade hidráulica saturada aumenta com a granulometria das partículas do solo (Davie, 2008: 63). Em muitos casos, estes poros interligam-se de forma contínua, promovendo o denominado fluxo preferencial, por oposição àquele que toma lugar de forma homogénea na matriz do solo³⁷.

Em condições não saturadas, os macro-poros transmitem (gravitacionalmente) apenas a água resultante do escoamento superficial que para eles flua. À medida que o teor em humidade (i.e. potencial capilar) diminui, os solos de textura mais fina tenderão a apresentar uma condutividade hidráulica superior aos de textura grosseira em função da maior proporção de poros capazes de transmitir água por capilaridade (Brady e Weil, 2008: 196).

Com respeito aos solos ricos em argilas, é de salientar que a mesma expansibilidade que promove uma macro-porosidade responsável por elevadas taxas iniciais de infiltração (na forma de fendas resultantes de ciclos de humedecimento-dessecação) leva a acentuadas reduções nestas mesmas taxas à medida que os poros se fecham com o aumento do volume (Brady e Weil, 2008: 198).

Por fim, é importante considerar que a textura e a estrutura do solo sofrem frequentemente variações ao longo do seu perfil. Este é o caso das situações em que se sobrepõem camadas com condutividades hidráulicas muito diferenciadas, de que são exemplos uma camada relativamente densa e pouco porosa, compactada pela lavra (*plow pan*), sob um solo permeável mas pouco espesso (Thornes, 1980: 132; Toy *et al.*, 2002: 293).

³⁷ O alargamento destas vias sub-superficiais de escoamento concentrado origina o fenómeno erosivo denominado tubulação (*piping*), cujas ligações com o ravinamento serão consideradas no âmbito dos movimentos de massa.

Fragmentos de rocha

A natureza da textura interage com o grau de cobertura em fragmentos de rocha e a posição vertical (i.e. grau de inserção) destes no solo. Poesen (1992) observou que, para fragmentos parcialmente integrados num solo selado, ou seja, com uma porosidade textural, a erosão aumenta exponencialmente com o grau de cobertura. Este resultado foi atribuído a um efeito positivo sobre o volume e a velocidade do escoamento, já que a selagem do solo reduz a taxa de infiltração, e a diminuição da área entre os fragmentos canaliza o fluxo (op.cit.: 276). Esta relação só ocorrerá até um limiar, a partir do qual o aumento da cobertura diminuirá a erosão (até ser atingido um valor nulo associado a uma cobertura de 100%). Este limiar é aproximado à medida que o fluxo remove sedimentos e a concentração em fragmentos de rocha aumenta gradualmente à superfície do solo.

Por oposição a esta relação positiva, Poesen (1992) e depois Poesen *et al.*, (1999) definiram a ocorrência de uma relação negativa quando os fragmentos estão parcialmente integrados num solo com porosidade estrutural (i.e. sem um selo formado) ou quando estão sobre a superfície do solo, independentemente da porosidade deste. Nestes casos, prevalece o efeito protector dos fragmentos face ao impacto da precipitação, e o seu efeito potenciador da infiltração, reduzindo a erosividade do fluxo.

Para além da concentração e posição vertical dos fragmentos de rocha, a sua dimensão também influencia o processo erosivo. Poesen e Lavee (1991, ref. por Poesen, 1992) observaram que para um dado grau de cobertura, a perda de sedimentos aumenta com o tamanho dos fragmentos³⁸, resultado associado ao aumento do volume e da velocidade do escoamento. Resultados equivalentes foram obtidos por Van Wesemael *et al.* (2002: 136) num solo de textura franco-argilosa (*clay loam*), no qual uma cobertura de calhaus com um diâmetro médio de 14,6 cm esteve associada a perdas de solo maiores do que uma cobertura de cascalho com 4,4 cm.

Os resultados descritos deixam claro que a influência dos fragmentos de rocha na infiltração, e portanto na erosividade do escoamento, é condicionada por um conjunto de diferentes parâmetros (dimensão, concentração, posição vertical e natureza da porosidade do solo), podendo ter uma expressão ambivalente (Poesen, 1992: 266).

³⁸ Os autores não usaram rochas naturais, tendo recorrido a fragmentos artificiais de poliestireno.

Matéria orgânica

A matéria orgânica, natural ou introduzida no solo num contexto agrícola, promove a agregação, a infiltração e a retenção da água (Morgan, 2005: 188; Blanco e Lal, 2008: 139). Quando fornecida na forma de uma cobertura superficial (e.g. resíduos de colheita), reduz a velocidade do escoamento ao introduzir rugosidade hidráulica, diminuindo a erosividade. Em grandes concentrações, porém, o seu efeito hidrofóbico pode tornar-se um problema pelo aumento do volume de escoamento originado (Le Bissonnais, 1996: 45).

Estabilidade dos agregados

Para além das variáveis até agora referidas, a estabilidade dos agregados do solo também pode exercer um controlo determinante sobre a infiltração. Este resulta do seu papel no fenómeno de *selagem* do solo (Le Bissonnais, 1996: 55), ou seja, a formação de uma camada superficial, muitas vezes pouco duradoura, sob o impacto das gotas de chuva ou de irrigação, e que restringe grandemente a permeabilidade do solo, atingindo habitualmente taxas de infiltração entre 0 e 5mm/h (Bresson *et al.*, 2006: 489).

Para além da geração de escoamento, a selagem influencia directamente a resistência que lhe é oposta, sendo essa influência alvo de atenção em I.4.1.2.2.

A estabilidade dos agregados do solo pode ser definida como a resposta estrutural deste à precipitação (Le Bissonnais, 1996: 41), e é uma função da dinâmica entre tensão aplicada e resistência material (Bryan, 2000: 400). A tensão aplicada resulta do próprio impacto das gotas e dos efeitos do humedecimento do solo associado. A resistência material está relacionada com um conjunto de diferentes características pedológicas, enumeradas mais à frente.

A energia cinética resultante do impacto das gotas tem diferentes efeitos: a desagregação mecânica dos agregados do solo (Shainberg e Levy, 1996a: 3), a projecção de partículas em redor do ponto de impacto pelo movimento da água (Morgan, 2005: 17), e um efeito de compactação (Shainberg e Levy, 1996a: 3; Bresson *et al.*, 2006: 491). O aumento da pressão do ar nos poros resultante desta compactação foi já associado à liquefacção da camada superficial (De Ploey e Poesen, 1985: 102).

A progressão da frente de humedecimento e o aumento do conteúdo em água do solo estão também na origem de diferentes processos. A compressão do ar nos poros leva à fragmentação dos agregados. A expansão diferencial de componentes texturais do solo (i.e. argilas expansivas) origina a formação de micro-fissuras (Govers *et al.*, 1990: 321; Knapen *et*

al., 2007: 94). Verificando-se as condições químicas necessárias, ocorrerá dispersão das argilas (Bresson *et al.*, 2006: 491). As partículas dispersas, por sua vez, depositam-se a uma profundidade variável entre 0,1 e vários milímetros (Agassi *et al.*, 1981, ref. por Shainberg e Levy, 1996a: 3; De Ploey e Poesen, 1985: 102) onde obstruem a porosidade do solo, reduzindo grandemente a sua capacidade de infiltração, e originando o que Poesen (1992: 263) denomina “pavimento de filtração” (*filtration pavement*)³⁹. Esta é, tipicamente, a camada inferior de um selo, subjacente à camada superficial compactada pelo impacto das gotas (Lado *et al.*, 2004: 1992).

Paralelamente à selagem, as acções de desagregação e compactação levam à diminuição da rugosidade da superfície topográfica, reduzindo a retenção superficial e aumentando a velocidade do fluxo (Bresson *et al.*, 2006: 492).

Os processos associados à formação de um selo são fortemente controlados pela humidade antecedente do solo. Se este estiver seco, e especialmente se a precipitação for intensa, a fragmentação é máxima e a capacidade de infiltração reduz-se rapidamente. Contudo, um aumento do teor antecedente em água leva à diminuição da coesão entre as partículas de argila e das tensões resultantes da sua expansão, bem como da velocidade de progressão da frente de humedecimento, o que leva a que a precipitação intensa em solos húmidos tenda a originar deformação plástica e compactação, por oposição à fragmentação dos agregados (Bryan, 2000: 401).

De acordo com os processos específicos subjacentes à sua formação, são geralmente individualizados dois tipos de selos: *estruturais*, resultantes da destruição da estrutura do solo pelo impacto das gotas; e *deposicionais*, resultantes da mobilização selectiva e deposição de partículas finas pelo escoamento⁴⁰ (Wakindiki e Ben-Hur, 2002: 897). Os dois tipos tendem a ocorrer sequencialmente (Bresson *et al.*, 2006: 491), já que o selo estrutural inicial dá lugar, com a redução da infiltração, a um fluxo superficial que transporta e deposita os materiais finos destacados. É de salientar o papel da relação entre micro-topografia e precipitação na localização de cada tipo: em solos de elevada rugosidade (e.g. com torrões grandes ou sulcos de lavra) uma trajectória oblíqua da precipitação pode levar à formação de um selo estrutural nas superfícies a barlavento, deposicional nas depressões, e à ausência de selagem nas superfícies a sotavento (Poesen, 1992: 269).

³⁹ Este pavimento de filtração forma-se apenas em solos onde as argilas têm condições para se dispersar (Shainberg e Levy, 1996a: 17), e onde há argila suficiente para obstruir os poros das partículas de maiores dimensões (Le Bissonnais, 1996: 42; Shainberg e Levy, 1996a: 4).

⁴⁰ Foram já estabelecidos diferentes sub-tipos de selos em função de critérios mais específicos, e em associação a diferentes graus de impermeabilização causada no solo (e.g. Bresson *et al.*, 2006: 490). No entanto, a sua consideração sai do âmbito da presente revisão.

Quando o solo seca após a selagem, a camada afectada pelo processo passa a denominar-se *crosta*. Os selos/crostras têm um papel importante na geração de escoamento (hortoniano), permitindo que este se verifique com eventos de precipitação muito menos intensa do que seria necessário em condições inalteradas de estrutura do solo.

A redução da taxa de infiltração aumenta o volume de água disponível para escoar à superfície; ao mesmo tempo, a redução da rugosidade diminui a retenção em depressões micro-topográficas e aumenta a velocidade do fluxo, i.e. a sua erosividade (Bresson *et al.*, 2006: 492).

Em função do seu efeito agregador de partículas de maiores dimensões, bem como à forte coesão que tende a estabelecer, o conteúdo em argila é habitualmente considerado um factor positivo de estabilidade (Le Bissonnais, 1996: 42). Este papel é condicionado por variáveis como a mineralogia das argilas presentes, a distribuição das suas dimensões, e as condições químicas da água no solo. Um conteúdo muito reduzido em argila, mesmo não promovendo a agregação, pode condicionar ou impossibilitar a formação de selo, não sendo sequer suficiente para obstruir a porosidade (Ben-Hur *et al.*, 1985, ref. por Lado *et al.*, 2004: 1993; Wakindiki e Ben-Hur, 2002: 903), e em particular quando a fracção de partículas grosseiras (i.e. areias e gravilhas) é elevada (Le Bissonnais, 1996: 42). Um conteúdo elevado em argilas condicionará a selagem pelo efeito agregador já referido, e um conteúdo intermédio será o que mais a promoverá, já que contém argila suficiente para a obstrução, mas não para estabilizar os agregados (Ben-Hur *et al.*, 1985, ref. por Lado *et al.*, 2004: 1993). De forma oposta, porém, um maior teor em argila implica também um aumento da intensidade do mecanismo de desagregação (i.e. compressão do ar nos poros e expansão diferencial), o que contraria o efeito estabilizador. Desta forma, e conforme observado por Lado *et al.*, 2004 em solos esmectíticos, quanto maior o teor em argila, maior o controlo exercido pela humidade antecedente do solo. Os autores submeteram amostras a precipitação simulada, comparando as taxas finais de infiltração para dois estados iniciais: solo seco, e solo humedecido lentamente a uma taxa de 1 mm/h de precipitação até ser atingida metade da sua capacidade de campo. Numa amostra com 620 g/kg de argila, observaram uma taxa final de infiltração muito inferior para condições iniciais de secura. Em amostras com 230 e 410 g/kg, a diferença entre as taxas iniciais e finais foi substancialmente inferior. A redução acentuada da infiltração no solo com mais argila foi atribuída ao aumento da intensidade da desagregação (i.e. selagem) para condições de secura inicial: na amostra previamente humedecida, a elevada estabilidade contrariou este efeito de desagregação. Inversamente, os outros solos registaram taxas finais de infiltração pouco diferentes não obstante a humidade inicial, o que levou os

autores a concluir que, para teores em argila mais baixos, a desagregação associada ao humedecimento (i.e. fragmentação por compressão do ar intersticial e expansão dos minerais) e a formação de um selo são pouco importantes (op.cit.: 1995).

A influência da composição mineralógica das argilas é grandemente controlada por factores químicos como a concentração de electrólitos na solução do solo ou a percentagem de sódio de troca. É, ao mesmo tempo, difícil de avaliar, já que os solos contêm frequentemente uma mistura de diferentes minerais de argila (Norton *et al.*, 2006: 423). Morgan (2005: 51) associa uma maior estabilidade dos agregados face às tensões causadas pelo humedecimento a argilas que não apresentam comportamento expansivo (e.g. caulinite, halloysite) e uma estabilidade mínima às argilas expansivas (e.g. esmectites, vermiculites). Esta noção foi confirmada por Wakindiki e Ben-Hur (2002: 903), que compararam solos com diferentes mineralogias, associando ao solo com maior conteúdo em montmorilonite a menor estabilidade, a mais elevada geração de escoamento, e a maior perda de sedimentos. A maior estabilidade foi associada à caulinite, estando na origem da quantidade mínima de escoamento observada. Mermut *et al.* (1997:212) definiram o predomínio de esmectite como causa da perda superior de sedimentos por parte de um solo de textura franca (30% de areia) face a um de textura franco-limosa (4% de areia), onde a caulinite se mostrou predominante.

Para além da sua expansibilidade, o comportamento dos minerais de argila face à água é grandemente condicionado pela natureza e quantidade dos catiões de troca do solo. A adsorção de iões monovalentes (Na, K) cria uma camada dispersa em torno das superfícies coloidais, reduzindo as forças de coesão entre partículas e não conseguindo equilibrar a sua electronegatividade. O resultado é a repulsão entre as partículas de argila, dando origem ao estado dito *disperso* (Brady e Weil, 2008: 422). Por oposição, catiões bivalentes (Ca, Mg) são considerados não dispersivos⁴¹.

A ocorrência de dispersão é promovida pelo impacto mecânico das gotas (Shainberg e Levy, 1996a: 6), sendo importante no fornecimento dos materiais finos que se acumulam no pavimento de filtração durante a selagem do solo. Ao mesmo tempo, os solos dispersivos são propensos à formação de vias preferenciais para o escoamento sub-superficial denominadas tubos (*pipes*), já referidos.

A presença de óxidos de Fe e Al (sesquióxidos) tem sido positivamente correlacionada com a estabilidade estrutural do solo (De Ploey e Poesen, 1985: 101), contrariando a acção de

⁴¹ A dispersão é, por sua vez, controlada pela concentração de electrólitos na solução do solo (De Ploey e Poesen, 1985: 101; Brady e Weil, 2008: 422): quanto maior for esta concentração, maior será a quantidade de catiões monovalentes necessária para que os colóides se dispersem.

catiões dispersivos. A sua ocorrência na forma de camadas amorfas (i.e. sem uma estrutura cristalina definida) sobre os minerais de argila reduz a hidrofília do solo, diminuindo a velocidade com que o humedecimento toma lugar, e portanto a intensidade das tensões resultantes (Chenu *et al.*, 2000: 1483). O carbonato de cálcio também contraria o efeito dispersivo do sódio em função da libertação de catiões Ca, favorecendo a agregação (Shainberg e Levy, 1996a: 6; Lado *et al.*, 2005: 1437).

A matéria orgânica é um importante agente de estabilização dos agregados do solo (Evans, 1980: 117; De Ploey e Poesen, 1985: 100; Le Bissonnais, 1996: 45), exercendo duas ações fundamentais. Por um lado, aumenta a coesão entre agregados, seja pela ligação das partículas minerais por polímeros orgânicos ou pelo efeito físico das raízes finas e do micélio de fungos (Chenu *et al.*, 2000: 1479; Gyssels *et al.*, 2005: 195). Por outro, diminui a hidrofília dos agregados, reduzindo as suas taxas de humedecimento, e portanto as tensões associadas (Chenu *et al.*, 2000: 1479; Norton *et al.*, 2006: 424). No entanto, a relação entre hidrofobia e erosão não é linear: como já foi referido, a partir de uma determinada concentração de matéria orgânica, a diminuição da infiltração pode tornar-se um problema devido ao aumento do volume de escoamento (Le Bissonnais, 1996: 45).

As consequências da matéria orgânica na estabilidade dos agregados numa dada situação irão depender da natureza da matéria presente, já que diferentes fracções exercem diferentes efeitos sobre a agregação. Neste contexto, é importante considerar que as ligações entre os agregados do solo são actualmente entendidas em termos de uma hierarquia de dimensões, em que cada dimensão se associa a agentes de ligação específicos (Brady e Weil, 2008: 136; Bryan, 2000: 400). Polímeros orgânicos e polissacarídeos estão assim associados aos agregados de menores dimensões (até 90 μm); detritos microbiais e de plantas⁴², raízes e hifas de fungos estão associados a agregados até 250 μm . A partir destas dimensões, estes apresentam menor densidade e uma porosidade muito mais alta, incluindo fragmentos de rochas e detritos vegetais desprotegidos da decomposição. O seu comportamento diferenciado justifica o limite dos 250 μm para diferenciar micro de macroagregados. Os macroagregados são geralmente menos estáveis e resistentes à mobilização e sofrem maior perturbação durante episódios chuvosos, pelo que a sua proporção pode ser vista como um indicador de erodibilidade (Bryan, 2000: 407). De acordo com esta noção, Boix-Fayos *et al.* (2001: 65), referiram a associação entre agregados de pequenas dimensões e uma maior capacidade de

⁴² Em agregados destas dimensões, os detritos de plantas estão protegidos da decomposição por flocos de argila e partículas de silte e areia, bem como por agregados menores.

infiltração do solo, e a correlação positiva entre a percentagem destes agregados e a percentagem de matéria orgânica no solo.

A acção dos diferentes agentes de ligação sobre a estabilidade dos agregados varia no tempo, em função do fornecimento de matéria orgânica (dependente do estado e da dinâmica da vegetação, ou da acção do homem) e dos processos de decomposição activos. Este fornecimento pode ser mais sazonal e localizado (e.g. folhada em bosques caducifóleos) ou mais contínuo no tempo e disperso espacialmente (e.g. vegetação herbácea em pradarias) (Bryan, 2000: 406). Ao mesmo tempo, a agregação pode ser sujeita a transições mais ou menos bruscas na quantidade de matéria orgânica presente, como é o caso da sua eliminação por acção do fogo (Mataix-Solera e Guerrero, 2007: 20⁴³), do seu fornecimento em campos de cultivo como estrume, ou da eliminação da cobertura vegetal.

A actividade agrícola exerce diferentes efeitos. A curto prazo, a adição de estrume ou a permanência de resíduos de colheitas favorece a agregação (Ekwue *et al.*, 1993: 403; Blanco e Lal, 2008: 145). A longo prazo, e em função da lavra, o uso agrícola tende a diminuir a quantidade de matéria orgânica presente, expondo à decomposição material orgânico previamente protegido em micro-agregados, em condições quase anaeróbias (Evans, 1980: 120; Chenu *et al.*, 2000: 1485).

As raízes das plantas exercem diferentes efeitos positivos na estabilidade dos agregados. Em primeiro lugar, a sua acção contribui para agregar fisicamente o solo (Gyssels e Poesen, 2003: 372). Ao mesmo tempo, as suas secreções (exsudados radiculares) contribuem para ligar partículas finas e promover a formação de macro-agregados estáveis, mesmo quando a raiz já está morta. As raízes fornecem matéria orgânica aos organismos decompositores, promovendo a ocorrência de populações microbianas na rizosfera, e servem de alimento a animais (Gyssels *et al.*, 2005: 195). A influência positiva sobre os organismos do solo tem consequências indirectas na agregação, já que as bactérias e as hifas de fungos também produzem agentes de ligação⁴⁴. As hifas exercem adicionalmente um efeito mecânico na agregação.

No que diz respeito à macro-fauna do solo, as minhocas adquirem expressão através dos moldes (*casts*) que expõem, e que consistem em glóbulos de solo nos quais coexistem materiais orgânicos e minerais, misturados com microrganismos e secreções no sistema

⁴³ Embora fogos de elevada intensidade possam levar à combustão e destruição da matéria orgânica, a acção do fogo é complexa. A componente orgânica pode mesmo aumentar após a ocorrência de um fogo de baixa intensidade, em função da deposição de matéria semi-pirolisada (i.e. parcialmente decomposta, por acção do calor e ao abrigo do ar) e cinzas, e resultante libertação de nutrientes (Mataix-Solera e Guerrero, 2007: 8).

⁴⁴ Este é o caso da proteína glomalina, produzida por fungos micorrízicos (Brady e Weil, 2008: 138)

digestivo do animal (Brady e Weil, 2008: 456). Estes moldes, que podem chegar a cobrir 50 a 60% da superfície do solo (op.cit.) têm a particularidade de serem muito estáveis face ao impacto da precipitação (Morgan, 2005: 57). Boix-Fayos *et al.* (2001: 64), porém, referem que os moldes se encontram frequentemente consolidados num material endurecido e de reduzida porosidade, o que contribui para reduzir a capacidade de infiltração⁴⁵.

É importante salientar que não há consenso na literatura quanto ao método mais adequado para caracterizar a estabilidade dos agregados do solo, tendo sido utilizadas diferentes metodologias (Morgan, 2005: 53). Exemplos são a utilização da energia total das gotas de água necessárias para destruir um agregado individual (Ekwue *et al.*, 1993), do número de gotas (Boix-Fayos *et al.*, 2001) ou a submersão de agregados em água, sendo a estabilidade considerada uma função da distribuição das dimensões dos agregados resultantes (Lado *et al.*, 2004). A utilização de diferentes técnicas e desenhos experimentais e a diversidade nas características dos solos estudados dificultam a integração dos resultados (Le Bissonnais, 1996: 56).

4.1.2. Erodibilidade

Tal como a capacidade erosiva do escoamento, a resistência oposta pelo solo resulta da interação entre um conjunto de factores. Bryan (2000: 397) refere que quase todas as propriedades do solo influenciam a sua resposta à erosão, mas nenhuma delas representa individualmente a resposta integrada que constitui a sua erodibilidade. Para além da textura, factores como as raízes e os fragmentos de rocha presentes ou as alterações resultantes da lavoura condicionam a sua resposta erosiva. Todos estes factores conferem a esta resposta uma elevada variabilidade espacial e temporal, tornando a erodibilidade num conceito complexo que não foi ainda totalmente compreendido (Knapen *et al.*, 2007: 76). Esta complexidade desencoraja o uso de índices genéricos como o factor K da Equação Universal de Perda do Solo (Wischmeyer e Smith, 1978), que não leva em conta as variações sazonais resultantes da lavoura ou as variações no conteúdo em água durante e entre episódios de precipitação⁴⁶. A natureza empírica de K faz com que o uso do nomógrafo origine problemas em contextos pedológicos diferentes dos que lhe serviram de base, por exemplo quando o conteúdo em matéria orgânica do solo é superior a 4%, quando este possui argilas expansivas

⁴⁵ Notar que este efeito é o oposto das redes de bioporos originadas pelos mesmos anelídeos e favorecendo a infiltração.

⁴⁶ O factor K é calculado a partir de um nomógrafo com base na textura, conteúdo em matéria orgânica, estrutura e permeabilidade do solo.

(Morgan, 2005: 53), óxidos de Fe/Al, ou tendência para o encrostamento (Le Bissonais *et al.*, 2006: 685).

A análise da literatura permitiu definir a textura e a resistência tangencial como as propriedades pedológicas mais fundamentais na resposta do solo ao escoamento. O grau de importância que cada uma adquire num contexto específico é, porém, controlado pela existência de agregação e coerência (i.e. ligações entre os agregados) no solo. Podem assim definir-se três situações possíveis, determinando as variáveis que controlam a erodibilidade: em solos não agregados, a textura; em solos com agregação mas sem coerência (i.e. solos lavrados), a massa e dimensão dos agregados; em solos com agregação e coerência, a resistência tangencial da estrutura do solo (Bryan, 2000: 399). Estas variáveis foram alvo de consideração em separado, tendo sido considerada posteriormente a influência do conteúdo em fragmentos de rocha.

4.1.2.1. Factores de erodibilidade: textura

O controlo exercido pela textura do solo sobre a sua resistência à erosão é condicionado pela sua coesão e pela heterogeneidade das partículas que o constituem.

Sheridan *et al.* (2000 a,b, refs. por Knapen *et al.*, 2007: 92) definiram, num contexto de escoamento em sulcos, que partículas inferiores a 0,02 mm contribuem para a existência de coesão e para uma erodibilidade reduzida, que aumenta a partir destas dimensões. Savat (1982, ref. por Morgan, 2005: 22) definiu um diâmetro de 0,2 mm como tendo um papel crítico em solos com coesão: a partir deste valor, a força necessária para o destacamento aumenta com o diâmetro das partículas e também com a sua diminuição (Figura 4). A erodibilidade reduzida das partículas de menores dimensões prende-se com a forte coesão entre os minerais de argila que as constituem. No caso das partículas de maiores dimensões, deve-se ao facto de ser necessária mais energia para a sua mobilização e transporte (Evans, 1980: 116). Como é visível na Figura 4, esta relação não se verifica com material sem coesão (e.g. previamente destacado), em que as partículas menores são muito facilmente removidas.

O teor em água do solo exerce um controlo fundamental sobre a coesão, que diminui com o seu aumento, excepto quando a quantidade de água é muito reduzida⁴⁷ (Bryan, 2000: 402; Knapen *et al.*, 2007: 94). Adicionalmente, os resultados obtidos por Bryan e Rockwell (1998), e depois por Rockwell (2002: 506), permitem concluir que as condições hidrológicas no subsolo também influem na coesão: a formação e a ascensão de uma toalha freática em

⁴⁷ Com um teor de água muito baixo, as ligações entre partículas são de dimensão molecular e estas não se encontram livres para se reorientarem para uma posição de baixa energia e alta coesão (Knapen *et al.*, 2007: 94).

profundidade originaram aumentos acentuados nas taxas de erosão medidas em flumes laboratoriais, verificando-se este aumento antes da condição saturada atingir a superfície, o que levou a que este fosse atribuído ao aumento da pressão do ar nos poros.

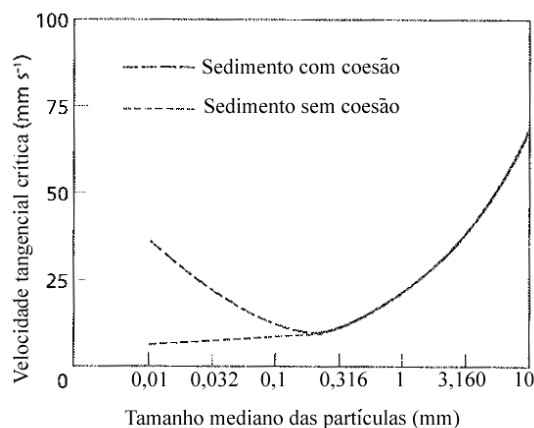


Figura 4 – Velocidade tangencial crítica necessária para o destacamento em função da dimensão das partículas, de acordo com Savat (1982). Extraído de Morgan (2005: 23).

As relações entre a dimensão e a força crítica para o destacamento dependem também da homogeneidade na granulometria do solo. Em condições heterogêneas, as partículas mais pequenas serão protegidas pelas maiores, sendo destacadas apenas quando a tensão exercida pelo escoamento é suficiente para destacar estas últimas (Morgan, 2005: 22).

A importância dos materiais mais finos para a coesão justifica que o conteúdo em partículas de argila seja usado como um indicador de erodibilidade. Adicionalmente, estas partículas combinam-se com a matéria orgânica para produzir agregados, e a estabilidade destes (i.e. a facilidade com que se fragmentam e a dimensão dos fragmentos resultantes) determina em parte a resistência oferecida pelo solo (Ekwue *et al.*, 1993: 404; Le Bissonnais, 1996: 44). De acordo com Evans (1980: 116), os solos com entre 9 e 30% de minerais de argila serão os mais erodíveis⁴⁸. No entanto, o papel das argilas na erodibilidade é complicado pelo processo de selagem, conforme considerado mais à frente com relação à resistência tangencial (vd. 4.1.2.2).

Numa análise recente da literatura, Knapen *et al.* (2007) sintetizaram a resistência à erosão causada pelo escoamento concentrado associada a diferentes classes de textura do solo, expressa em termos de dois indicadores: a tensão tangencial crítica para a ocorrência de destacamento, τ_{cr} , expressa em Pa, e a erodibilidade K_c , sendo esta última equivalente ao

⁴⁸ A estabilidade dos agregados foi já considerada com respeito à erosividade, em função do seu efeito sobre a infiltração e a geração de escoamento.

declive da linha de regressão entre a tensão tangencial exercida (τ) e a capacidade de destacamento resultante no fluxo (D_c , em $Kg.m^{-2}.s^{-1}$). Os dados considerados foram obtidos em terrenos agrícolas, submetidos a uma lavoura convencional. O gráfico da Figura 5 revela uma erodibilidade máxima associada a solos de textura franco-limosa (*silt-loam*), seguidos dos de textura franca (*loam*), e uma erodibilidade mínima (bem como o mais alto valor de tensão tangencial crítica) associada aos solos argilosos. Este padrão é compatível com ambos os valores críticos de dimensão das partículas acima comparados (Savat, 1982; Sheridan *et al.*, 2000a, b), situados, respectivamente, nas areias finas e nos limos⁴⁹, e com a proporção de argila referida por Evans (1980) como estando associada a uma resistência mínima à erosão (9-30%). A Figura 5 reflecte a noção, generalizada na literatura, de que os solos mais erodíveis são aqueles ricos em limos e areias finas (De Ploey e Poesen, 1985: 115; Poesen, 1992: 280; Le Bissonnais, 1996: 42; Toy *et al.*, 2002: 32; Morgan, 2005: 50).

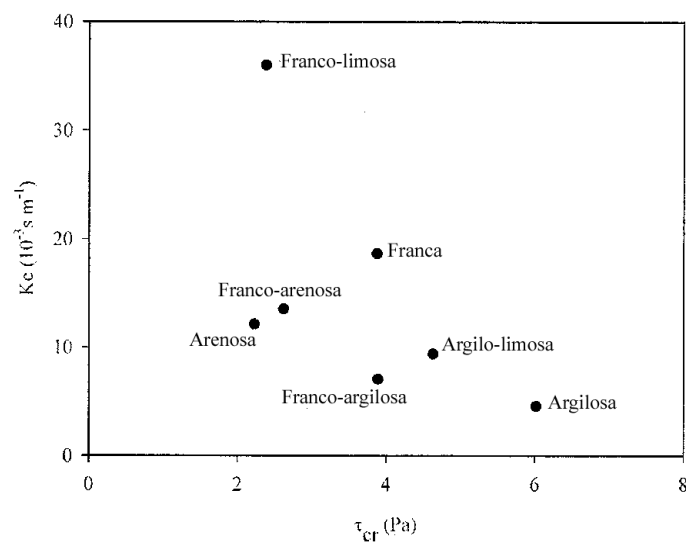


Figura 5 – Relação entre algumas classes de textura do solo e a sua resistência à erosão por escoamento concentrado. Extraído de Knapen *et al.* (2007: 89).

Como foi já referido, havendo agregação mas não coerência, a erodibilidade será controlada não pela textura, mas sim pela dimensão e massa dos agregados individuais (Bryan, 2000: 399). Esta situação tenderá a ocorrer em situações de solo lavrado, onde as ligações entre os agregados foram eliminadas. Embora a coerência se reestabeleça naturalmente, é um parâmetro a considerar no contexto da erodibilidade, determinando, num dado momento, qual a propriedade pedológica mais importante na resistência à erosão: dimensão e massa dos

⁴⁹ Na classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a dimensão de 0,02 mm está incluída na classe dos limos (siltes), e a de 0,2 mm na classe das areias finas (Brady e Weil, 2008: 123)

agregados individuais (em solos não-coerentes) ou resistência tangencial da estrutura do solo (solos coerentes) (Bryan, 2000: 399).

No caso específico dos solos agregados, um controlo importante sobre a erodibilidade pode ser exercido pela ocorrência de ciclos de congelação-descongelação. O congelamento origina a fragmentação dos agregados, sobretudo se o arrefecimento se der rapidamente (Bryan, 2000: 403) e quando vários destes ciclos ocorrem sucessivamente (Blanco e Lal, 2008: 63). Durante o descongelamento, condições de elevado conteúdo em água no solo e baixa densidade aparente originam uma superfície altamente erodível (Morgan, 2005: 57).

4.1.2.2. Factores de erodibilidade: resistência tangencial

A resistência tangencial do solo (τ) é uma medida da sua resistência à cedência sob uma força aplicada (i.e. gravidade, fluidos em movimento, pressão mecânica) e é expressa empiricamente pela equação de Coulomb como,

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

em que c é a coesão, σ' é a tensão normal ao plano de ruptura tangencial (ambas em unidades de força por unidade de área), e ϕ é o ângulo de fricção interna. A equação simplifica as relações entre os muitos factores responsáveis por este parâmetro, cujas acções só são conhecidas qualitativamente (Morgan, 2005: 51), individualizando duas componentes: coesão e fricção interna. A primeira inclui os agentes de ligação entre partículas texturais e agregados de diferentes dimensões (já referidos com respeito à estabilidade dos agregados, Cap. 4.1.1.4.); a segunda inclui o tamanho, a forma e organização espacial das próprias partículas e agregados, bem como a tensão normal ao plano ao longo do qual a tensão considerada é exercida (Bryan, 2000: 401; Leonard e Richard, 2004: 234).

A revisão da literatura permitiu definir como variáveis fundamentais de controlo sobre a tensão tangencial o teor de humidade do solo, o seu grau de compactação, a consolidação que toma naturalmente lugar após perturbações (e.g. lavoura), denominada *envelhecimento* na literatura (*ageing* ou *age-hardening*) e a acção das raízes das plantas, tendo cada uma sido alvo de consideração em separado. Uma variável adicional é, tal como já referido para os solos agregados mas não coerentes, a ocorrência de ciclos de congelamento/descongelamento, contribuindo para fragmentar os agregados e introduzir descontinuidades na estrutura do solo, reduzindo a sua resistência tangencial⁵⁰.

⁵⁰ Os ciclos de congelamento/descongelamento também têm efeito no contexto dos movimentos de massa, considerados em I.4.2.

Teor em humidade

O teor em água do solo exerce influência sobre ambas as componentes da resistência tangencial. Tal como já foi referido com respeito à textura, a coesão entre partículas tende a diminuir com o seu aumento. A componente friccional é sobretudo influenciada pelo potencial de água no solo, face ao qual varia inversamente. No entanto, em função da reduzida espessura da camada do solo directamente afectada pela erosão, esta componente é habitualmente assumida como insignificante (Bryan, 2000: 402).

Uma forma adicional de controlo exercida pela humidade advém da fracturação associada à ocorrência de ciclos de humedecimento e dessecação em associação a argilas expansivas, originando descontinuidades na estrutura do solo e, em condições de grande intensidade, fornecendo fragmentos facilmente mobilizáveis pelo escoamento (Gallart *et al.*, 2002: 306).

Compactação

A compactação do solo (i.e. o aumento da sua densidade aparente) também influencia a sua resistência. Havendo drenagem, o solo compactado tenderá a possuir maior resistência tangencial, em função do efeito de encaixe (i.e. componente friccional) e da subsequente maior quantidade de ligações entre partículas e agregados (Knapen *et al.*, 2007: 94)⁵¹. No contexto específico dos milímetros superficiais do solo, é aqui importante referir o aumento da densidade aparente que resulta do processo de selagem/encrostamento⁵², contrariando a maior erosividade impressa ao fluxo (Le Bissonnais, 1996: 55; Bryan, 2000: 399), e condicionando a aplicabilidade da susceptibilidade à selagem como indicador de propensão para a erosão. Neste contexto, Bresson *et al.* (2006: 492) referem que, embora em áreas cultivadas da região Norte da Bacia de Paris os campos encrostados sejam os principais produtores de escoamento, a maioria das perdas de solo ocorre em campos recentemente lavrados e de solo bem estruturado, sugerindo a sobreposição da diminuição da erodibilidade ao aumento da erosividade resultante do incremento do escoamento superficial.

⁵¹ O efeito fortalecedor da compactação sobre a erodibilidade pode ser condicionado pelo teor em água durante o humedecimento. Govers *et al.* (1990: 322) observaram que, em solos secos, a intensidade dos mecanismos de desagregação torna irrelevante o grau de compactação do solo, originando taxas de erosão pouco diferentes entre solos compactados ou não compactados.

⁵² Este processo já foi caracterizado com respeito à influência da estabilidade dos agregados sobre a infiltração e a erosividade (vd. Cap.4.1.1.4).

Consolidação após perturbações

Além do efeito da compactação mecânica do solo, um controlo importante sobre a sua erodibilidade é exercido pela consolidação que toma lugar naturalmente depois de operações de lavoura, fenómeno denominado *envelhecimento*. Após a perturbação (i.e. eliminação da coerência), o solo consolida-se com o passar do tempo, à medida que novas ligações se estabelecem entre partículas e agregados. Um factor fundamental neste processo é a sucessão de eventos de precipitação, já que a redistribuição da água após cada evento gera potenciais negativos de água no solo, originando tensões efectivas que contribuem para a consolidação (Nearing e West, 1988: 471). Esta, por sua vez, resulta num aumento da resistência tangencial devido à acção dos meniscos, mantendo partículas e agregados em proximidade, e assim favorecendo a formação de ligações (Nearing *et al.*, 1988: 932). Quando um solo é mantido sob uma pressão intersticial negativa (sucção) durante um dado período, sendo-lhe depois fornecida água (diminuindo a sucção), a sua resistência tangencial final incluirá uma parte da força ganha sob a sucção anterior, devido às ligações que nessa altura se estabeleceram. Este fenómeno implica que a resistência do solo num dado momento não é influenciada apenas pelo seu conteúdo em água, mas também pela evolução anterior desse conteúdo, e levanta a hipótese de que quanto maior for a duração da sucção no solo, maior a quantidade de ligações que se manterão aquando da sua eliminação (num episódio posterior de precipitação/irrigação) (op.cit.: 932).

Nearing e West (1988) testaram a importância relativa deste mecanismo para três solos diferentes⁵³ comparando duas séries de dados: valores de resistência tangencial medidos ao longo de 32 dias sob uma pressão do ar nos poros constante; e os valores de resistência tangencial medidos ao longo de 18 dias com forças de sucção no solo progressivamente superiores (entre 0 e 32 kPa). Concluíram que o factor dominante no ganho de resistência é a crescente sucção, e que, ao contrário do que acontece com os valores crescentes de sucção, os valores sucessivos de tempo acumulado não se correlacionam bem com os valores crescentes de resistência tangencial. Esta conclusão está em consonância com Shainberg *et al.* (1996b, refs. por Knapen *et al.*, 2007: 95) que não observaram variação na erodibilidade do solo ao longo do tempo numa amostra de solo seca⁵⁴.

Apesar da variabilidade nos instrumentos e parâmetros experimentais, os resultados tornam evidente o efeito importante da consolidação na resistência tangencial do solo. Num solo

⁵³ Foram usados um solo argiloso, um franco-limoso e um arenoso.

⁵⁴ O parâmetro de erodibilidade usado foi a taxa de aumento da capacidade de destacamento de sedimentos com o aumento da tensão tangencial exercida (i.e. o coeficiente *b* da recta de regressão entre ambos) (Knapen *et al.*, 2007: 83).

franco-limoso, Nearing e West (1988: 471) mediram um aumento de 11 vezes na resistência tangencial ao longo de 18 dias, com sucções sucessivas entre 0 e 32 kPa. Nearing *et al.* (1988: 932) observaram aumentos de 5,6 vezes ao longo de 12 dias, com sucções entre 4 e 64 kPa.

Raízes das plantas

As raízes das plantas exercem um controlo importante na resistência tangencial do solo, assentando este no facto de a sua maior resistência ser em termos tensesis, quando a maior resistência do solo se exprime em termos compressivos (Gyssels *et al.*, 2005: 196). A combinação de solo e raízes origina um material composto cuja força é maior do que as forças separadas dos seus componentes. No entanto, a magnitude do reforço originado depende de um conjunto de diferentes parâmetros, que incluem propriedades morfológicas das raízes (distribuição das raízes com a profundidade, diâmetro⁵⁵, tortuosidade), as forças tensesis dos vários segmentos da raiz, a fricção produzida na interface raiz-solo e a orientação das raízes com relação à direcção principal do esforço exercido (De Baets *et al.*, 2008: 208). Adicionalmente, as raízes reduzem o teor de humidade no solo envolvente: ao reorientarem as partículas de argila paralelamente ao seu eixo, diminuem a distância entre partículas do solo, aumentando a densidade deste, e portanto a sua resistência tangencial (Gyssels *et al.*, 2005: 195). Todos estes parâmetros originam dificuldades na estimação do fortalecimento do solo, já que o comportamento das raízes não pode ser considerado como a oposição de uma única força à tensão tangencial originada pelo escoamento, consistindo antes num processo gradual. Na realidade, as raízes quebram-se sucessivamente, sendo a tensão, com cada ruptura, dividida entre as restantes. Ao mesmo tempo, ocorrem diferentes processos para além da ruptura, como o alongamento das raízes ou o seu arrancamento do solo sem que chegue a ocorrer ruptura. A importância relativa destes dois processos é ainda influenciada pelo conteúdo em água do solo: mais água originará menos coesão e potenciará o arrancamento; menos água aumentará a resistência tangencial do solo, e potenciará a ruptura das raízes quando submetidas a uma tensão suficiente (op.cit.: 222).

De uma forma geral, o papel das raízes na redução da erodibilidade pode ser descrito através de uma relação exponencial do tipo,

$$Erod = e^{-b.PR}$$

⁵⁵ De forma geral, a força ténisil tende a variar inversamente ao diâmetro das raízes (De Baets *et al.*, 2008: 214), o que foi já atribuído a um maior conteúdo em celulose. No entanto, a taxa desta variação difere de espécie para espécie. Os autores testaram laboratorialmente 25 espécies de plantas mediterrâneas (com diâmetros de raiz inferiores a 8 mm), observando que diferentes espécies podem possuir raízes com força ténisil semelhante, mas em que a diminuição desta com o aumento do diâmetro é bastante diferenciada (op.cit: 216).

em que *Erod* é a erodibilidade relativa⁵⁶, *PR* é um parâmetro que descreve a densidade das raízes, seja em termos de massa ($Kg.m^{-3}$) ou de comprimento ($Km.m^{-3}$), e *b* é uma constante. O parâmetro *b* tende a variar de acordo com o processo erosivo considerado. Gyssels *et al.* (2005) fizeram uma análise da literatura, concluindo que o seu valor aumenta à medida que se progride da erosão por escoamento não concentrado (i.e.inter-sulcos) para a erosão em sulcos, e por fim em ravinas (efémeras)⁵⁷. Paralelamente a este aumento progressivo da importância das raízes na erodibilidade, a acção protectora da parte aérea da vegetação diminui, sendo máxima para o escoamento não concentrado⁵⁸. Assim, se neste tipo de escoamento a biomassa acima do solo é o factor de vegetação mais importante, na erosão por escoamento concentrado a acção das raízes pode ter uma importância no mínimo equivalente, pelo que a sua consideração é importante (op.cit: 213).

Das relações descritas entre a densidade das raízes e a erodibilidade do solo, e entre o diâmetro das raízes e a sua resistência, decorre que as espécies mais adequadas à protecção do solo contra o escoamento superficial serão aquelas com raízes densas, finas e pouco profundas, como é o caso das raízes de herbáceas e de cereais (Gyssels e Poesen, 2003: 382; Gyssels *et al.*, 2005: 211; De Baets *et al.*, 2006: 55). De Baets *et al.* (2008) calcularam aumentos aproximados de resistência tangencial do solo entre os 100 e os 244 *kPa* para diferentes espécies de herbáceas mediterrâneas.

Para além da sua importância variável em função dos processos erosivos considerados, existe um padrão temporal na variação da importância das raízes e da parte aérea das plantas na erosão do solo, controlado pelo seu ciclo de crescimento (Gyssels e Poesen, 2003: 381). As raízes são fundamentais onde a biomassa superficial é reduzida ou eliminada, como é o caso das áreas recentemente ardidadas, áreas sujeitas a pastoreio excessivo ou campos lavrados.

Apesar de a resistência tangencial ser aparentemente a variável com maior importância na resistência ao destacamento em solos coerentes (Bryan, 2000: 401), e ter sido considerada adequada à caracterização da resistência das diferentes camadas do solo ao escoamento concentrado e à formação de ravinas efémeras (Poesen e Govers, 1990: 525), a sua variabilidade espacial no terreno pode tornar difícil a obtenção de um único valor

⁵⁶ A erodibilidade relativa é a razão entre a erodibilidade (aumento da taxa de destacamento com a tensão tangencial exercida) de um solo com uma dada quantidade de raízes e a de um solo sem raízes.

⁵⁷ No que se refere à erosão associada ao impacto da precipitação (o denominado *splash*), *b* é sempre equivalente a 0, indicando que neste processo específico as raízes não têm importância (cf. observado por Ghidry e Alberts, 1997: 133), e a grande influência resulta da parte aérea da vegetação.

⁵⁸ A importância da parte aérea da vegetação foi já considerada com respeito à rugosidade imposta ao escoamento, e portanto ao seu efeito na erosividade (Cap. 4.1.1.3.).

representativo para um dado solo (Zimbone *et al.*, 1996: 110). Ao mesmo tempo, é difícil obter medições nas pequenas áreas onde as tensões se concentram, sobretudo em escoamento hidráulicamente rugoso.

Os valores obtidos dependem do tipo e modelo de instrumento utilizado. Zimbone *et al.* (1996) compararam diferentes instrumentos no terreno⁵⁹, concluindo que os de tipo *torvane* aplicam as tensões que mais se assemelham à do escoamento, enquanto os penetrómetros aplicam simultaneamente tensões tangenciais e compressivas. O seu uso, porém, é complicado pelas diferenças entre a profundidade da camada do solo afectada pelo fluxo (habitualmente de poucos milímetros) e a camada medida pelo instrumento, que por vezes é de vários centímetros (Bryan, 2000: 401) Como exemplos, Bryan e Poesen (1989: 219) consideraram valores referentes a uma camada superficial de 0,5 cm; Merz e Bryan (1993, refs. por Leonard e Richard, 2004: 239), referentes a uma camada de 3 cm, e Zimbone *et al.* (1996) mediram a resistência tangencial numa camada com um mínimo de 2,8 e um máximo de 5 cm de espessura.

4.1.2.3. Factores de erodibilidade: cobertura por fragmentos de rocha

Poesen *et al.* (1999) estudaram laboratorialmente a relação entre a percentagem do solo coberta por fragmentos de rocha⁶⁰ e a acção erosiva do escoamento concentrado. Os resultados obtidos revelaram uma relação exponencial negativa entre as duas variáveis, do tipo:

$$CS = e^{-b(CFR)}$$

em que CS é a concentração de sedimentos ($g.l^{-1}$) e b é um coeficiente indicativo da eficiência da cobertura de fragmentos de rocha (CFR , em %) na redução de CS . Esta relação é semelhante àquela descrita com respeito à erosão inter-sulcos por Poesen (1992: 282), e revela que a perda de sedimentos é progressivamente menor à medida que a cobertura de fragmentos de rocha aumenta. Por outro lado, este efeito protector é influenciado pela humidade antecedente do solo, sendo mais reduzido em condições de secura: foram obtidos valores de b de -0,032 para o solo com maior humidade, e de -0,017 para o mais seco⁶¹ (Poesen *et al.*, 1999: 327). A influência da humidade antecedente sobre o material erodido está de acordo com o observado num solo de classe textural semelhante (embora sem

⁵⁹ Foram comparados dois modelos de *torvane*, um *hand vane tester* e um penetrómetro de mão.

⁶⁰ Foi utilizado um solo franco-limoso (*silt loam*), estando os fragmentos de rocha distribuídos por toda a espessura de solo utilizada (9 cm).

⁶¹ Foram utilizados conteúdos gravimétricos em humidade médios de 4,1% e 21,4%.

fragmentos e com recurso a precipitação artificial) por Govers *et al.* (1990), sendo igualmente explicado com recurso aos fenómenos de fragmentação e microfissuração dos agregados do solo, o primeiro resultante do aumento da pressão do ar nos poros com a expansão da frente de humedecimento, e o segundo resultante da expansão da componente argilosa em contacto com a água (Govers *et al.*, 1990: 321; Poesen *et al.*, 1999: 323).

É de salientar que, tendo testado diversas concentrações de fragmentos entre 0 e 75%, Poesen *et al.* (1999) não observaram a formação de entalhes (*scour holes*) com concentrações superiores a 20%, o que, para a classe textural e declive utilizado (franco-limoso; 0,05) indicia um efeito inibidor da formação de cabeceiras inerente à canalização do escoamento (e.g. Bryan e Rockwell, 1998: 156; Yao *et al.*, 2008: 111).

4.1.3. A relação erosividade/erodibilidade na acção erosiva do escoamento: algumas conclusões

A análise da literatura respeitante à relação erosividade-erodibilidade e aos seus factores de controlo permitiu atingir várias conclusões.

Em primeiro lugar, não existe acordo quanto ao parâmetro mais adequado para a descrição da capacidade de destacamento e de transporte (Slattery e Bryan, 1992: 128; Govers *et al.*, 2007: 93), persistindo ainda incertezas quanto à própria natureza da relação entre estes dois processos (Govers *et al.*, 2007: 95). As mesmas variáveis hidráulicas que se revelam eficientes em certos contextos provam-se menos eficientes em outros. Um exemplo advém da comparação dos resultados obtidos por Nearing *et al.* (1997) e Giménez e Govers (2002). De acordo com as condições experimentais inerentes ao primeiro destes dois trabalhos⁶², em que foram utilizados leitos planos e outros com alguma rugosidade associada à forma da superfície (resultado da perturbação mecânica do solo destinada a simular condições de sementeira), os autores concluíram que o parâmetro com maior capacidade de prever a carga de sedimentos no fluxo num dado momento (capacidade de destacamento) é a potência do escoamento (ω). Entre os outros parâmetros testados, e considerados menos adequados, contou-se a tensão tangencial (τ). Estes resultados contrastam com aqueles obtidos por Giménez e Govers (2002: 1479) que, utilizando igualmente leitos regulares e rugosos, observaram um maior poder preditivo por parte da tensão tangencial, tendo a potência de escoamento produzido piores resultados.

⁶² Os autores utilizaram flumes laboratoriais de duas dimensões diferentes, parcelas experimentais no terreno, vários valores de declive entre 3 e 20 %, dois tipos de solo e um leito de areia não consolidada.

Em segundo lugar, os muitos resultados publicados tornam claro que a erosividade, embora apenas um dos dois grandes componentes da erosão, é em si o resultado de uma interacção complexa entre diferentes factores e processos. Exemplos já referidos desta complexidade são a relação destacamento-transporte (Cap. 4.1.1.1) e a retroacção velocidade-rugosidade descrita por Govers (1992) no escoamento em sulcos (Cap. 4.1.1.3).

Em terceiro lugar, ficou patente a ambivalência associada ao papel de diferentes variáveis nos processos erosivos, e a complexidade das suas interacções. Numerosos exemplos podem ser apontados. A formação de um selo superficial condiciona as taxas de infiltração, aumentando o volume de escoamento e portanto a sua erosividade. Ao mesmo tempo, porém, pode aumentar a resistência tangencial do solo e reduzir a sua erodibilidade, em oposição ao efeito anterior (Le Bissonnais, 1996: 55). A própria existência ou não de selagem (i.e. de porosidade textural ou estrutural) controla o efeito da cobertura de fragmentos de rocha sobre a erosão: estando os fragmentos parcialmente integrados no solo, a erosão correlaciona-se positivamente com a percentagem de solo coberto quando existe um selo, mas negativamente quando não existe (Poesen, 1992: 265). Neste caso, a protecção será controlada pela humidade antecedente: as tensões causadas pelo humedecimento em solos relativamente secos aumentam a perda de sedimentos para a mesma percentagem de cobertura (Poesen *et al.*, 1999: 326).

O mesmo controlo por parte da humidade antecedente condiciona os benefícios dos aumentos de densidade aparente (i.e. resistência tangencial) associados ao efeito de envelhecimento do solo ou à compactação mecânica: em condições de relativa *secura* antecedente, as tensões e a desagregação causadas pelo humedecimento podem ser tão significativas que a densidade aparente se torna pouco relevante (Govers *et al.*, 1990: 322). No contexto da erosividade, o mesmo conteúdo em água controla directamente a geração de escoamento erosivo através das taxas de infiltração, e indirectamente através da sua influência sobre a fragmentação dos agregados e a formação de selos superficiais (Bryan, 2000: 401).

A complexidade inerente às relações entre factores de erosividade e erodibilidade para uma dada área é aumentada pela variação espacial e temporal destes. Num dado momento, o conteúdo em água no solo tende a variar bastante à escala da vertente, afectando propriedades como a estabilidade dos agregados e a resistência tangencial (Bryan, 2000: 405). Semelhante variação espacial pode ocorrer com factores como a vegetação, o conteúdo em fragmentos de rocha, ou a própria topografia (e.g. quebras no declive). Paralelamente, a presença de plantas e resíduos vegetais sobre o solo, e de raízes sob este, pode variar significativamente ao longo do ano (e.g. em florestas caducifóleas e usos agrícolas), bem como as condições antecedentes

de humidade com que a superfície é sujeita às tensões do humedecimento e escoamento em episódios de precipitação.

No que diz respeito aos métodos de investigação, a literatura consultada permitiu constatar uma grande variedade de condições experimentais (e.g. flumes de diferentes dimensões e configurações, diferentes declives, com recurso ou não a precipitação artificial) não existindo frequentemente informação que permita determinar até que ponto os contrastes nos resultados são produto das diferenças nos procedimentos adoptados (cf. Bryan, 2000: 390). Mesmo em condições experimentais semelhantes, as diferenças nos tipos de solo utilizados e nos tratamentos a que estes são sujeitos originam uma grande variabilidade nos resultados (Knapen *et al.*, 2007: 89). Adicionalmente, os solos utilizados no laboratório são habitualmente preparados de forma a eliminar a macro-porosidade, a agregação, as raízes de plantas e a vegetação, bem como as variações das propriedades ao longo do perfil do solo e o papel da micro-topografia (e.g. sulcos de arado), pondo em causa a aplicação dos resultados a condições reais.

Toda esta complexidade leva à existência de diferentes parâmetros para caracterizar a erosividade do escoamento (e.g. tensão tangencial, poder do escoamento, poder unitário do escoamento), e leva a que a erodibilidade seja habitualmente tratada em modelos como um parâmetro de calibração (e.g. Foster *et al.*, 1995: 11.2). Neste contexto, os valores obtidos em estudos laboratoriais detalhados são depois otimizados com relação a cada aplicação específica de forma a maximizar a capacidade preditiva do modelo (Knapen *et al.*, 2007: 102). Esta abordagem simplifica a noção de resistência à erosão, tratando-a erradamente como uma única característica do solo.

No contexto específico da erosão por ravinamento, tema orientador do presente trabalho, a complexidade das relações erosividade/erodibilidade tem motivado uma abordagem empírica, assente na noção proposta inicialmente por Horton (1945, ref. por Jones, 1987: 213) de um limiar a partir do qual a força erosiva da água é superior à resistência oposta, definindo numa superfície o início da área onde existem condições para o entalhe. Este é o princípio por detrás dos numerosos trabalhos que pretendem prever a localização de ravinas efémeras com recurso a limiares topográficos, frequentemente do tipo,

$$S_{cr} = aA^{-b}$$

em que S_{cr} é um declive crítico (m/m), A é a área de drenagem (ha), a é um coeficiente e b um expoente (Vandaele *et al.*, 1996; Desmet e Govers, 1997; Vandekerckhove *et al.*, 1998, 2000a; Desmet *et al.*, 1999; Nachtergaele *et al.*, 2001; Vanwallegghem *et al.*, 2003, 2005a; Wu

e Cheng, 2005; Hancock e Evans, 2006; Parkner *et al.*, 2006; Zucca *et al.*, 2006; Kakembo *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2010; Muñoz-Robles *et al.*, 2010). Casali *et al.* (1999a) e De Santisteban *et al.* (2005) utilizaram o declive e a área de drenagem para estabelecer índices de susceptibilidade à formação de ravinas para diferentes bacias. Daba *et al.* (2003) utilizaram a distribuição espacial do produto do declive pela área de drenagem específica⁶³, denominado *índice de potência do escoamento (stream power index)* para explicar parcialmente a distribuição das ravinas existentes numa área de estudo na Etiópia.

4.2. Movimentos de massa

Os movimentos de massa relacionam-se com o ravinamento em três contextos: (i) o surgimento de novas ravinas em locais previamente não entalhados, e.g. vertentes (Alexander, 1982; Jones, 1987: 235; Menendez-Duarte *et al.*, 2007) ou terraços (Harvey, 1982); (ii) o seu surgimento através da bifurcação de canais pré-existentes, incluindo outras ravinas; (iii) a expansão de ravinas. A sua acção no surgimento de novas formas é necessariamente indirecta, na medida em que, por definição, só existe um canal mediante a acção do escoamento, mesmo que o colapso e a acção de entalhe tenham lugar quase em simultâneo (i.e. durante um episódio chuvoso). Por oposição, existe uma acção directa dos movimentos de massa na expansão de ravinas pré-existentes, quer esta se articule ou não com a acção do escoamento para originar uma bifurcação.

Os movimentos de massa ocorrem na cabeceira e nas paredes das ravinas, e são habitualmente considerados como dependendo da dinâmica entre duas forças: a resistência tangencial do material e as tensões sobre ele exercidas.

A resistência tangencial foi alvo de análise anterior (vd. 4.1.2.2.), pelo que se consideraram aqui os seus factores de controlo no contexto específico dos movimentos de massa.

A sobreposição de uma camada permeável a uma relativamente impermeável pode levar a que, em condições de alimentação em água, a camada subjacente aja como um plano de deslizamento, levando à ocorrência de colapsos (e.g. Van den Brink e Jungerius, 1983: 285).

As variações no volume da água no solo ao longo do tempo como resposta a ciclos de congelamento/descongelamento podem também constituir um factor de instabilidade, levando à fracturação e desagregação do material e à acumulação de depósitos facilmente mobilizáveis pelo escoamento (Prosser *et al.*, 2000). Efeito semelhante é produzido por ciclos de humedecimento e dessecação em associação à ocorrência de argilas expansivas (Gallart *et al.*,

⁶³ Área de drenagem total por unidade de comprimento das curvas de nível.

2002: 306). Prosser *et al.* (2000) determinaram para um canal na Tasmânia que estes dois processos, agindo respectivamente no Inverno e no Verão, controlam as taxas de erosão, já que o escoamento não produz tensões capazes de erodir as argilas que constituem o canal.

No caso específico dos ciclos congelamento/descongelamento, a deformação que tem lugar nas paredes e cabeceiras de ravinas pode não chegar a depositar material no fundo, condicionando-o porém (através do aumento das descontinuidades e da porosidade) para colapsos posteriores, desencadeados por aumentos da pressão intersticial em contextos de infiltração abundante (Thomas *et al.*, 2009: 120).

As raízes das plantas conferem força ao solo até uma profundidade de cerca de 0,75-1m para herbáceas, legumes e pequenos arbustos, mas que pode atingir os 3 m ou mais no caso de espécies arbóreas (Morgan, 2005: 64). Tal como foi já descrito para a acção erosiva do escoamento, contudo, o teor em água do solo condiciona a acção das raízes. Na ocorrência de tensão, um solo mais húmido contribuirá para o seu arrancamento sem que chegue a ocorrer ruptura, enquanto em condições mais secas a maior resistência tangencial levará a que as raízes contrariem a tensão até que a sua ruptura ocorra (Gyssels *et al.*, 2005: 222).

No contexto da tensão exercida, tanto o conteúdo em água como as raízes e a parte aérea das plantas exercem directamente um controlo importante através da sua massa. O declive da parede/cabeceira e a sua altura e configuração são também factores de tensão importantes (e.g. Blong *et al.*, 1982: 385; Betts *et al.*, 2003: 1054).

A revisão da literatura permitiu individualizar oito sub-processos activos na ocorrência de movimentos de massa em ravinas:

(1) sapamento basal nas paredes e cabeceiras em função da libertação das tensões exercidas pelo próprio peso do material, e do afloramento da drenagem sub-superficial⁶⁴ (Bradford e Piest, 1980: 90; Collison 2001: 10);

(2) sapamento basal nas paredes resultante da acção erosiva do escoamento no fundo da ravina;

(3) formação, alargamento e eventual colapso de tubos, frequentemente em materiais dispersivos, e afectando tanto a cabeceira como as paredes (e.g. Seeger *et al.*, 2009: 425);

(4) sapamento basal da cabeceira, directamente resultante do impacto vertical do escoamento (e.g. Oostwoud Wijdenes *et al.*, 2000: 154 ; Thomas *et al.*, 2004: 998), dando origem a uma forma deprimida particular (*plunge-pool*);

⁶⁴ Estas sapas são tradicionalmente denominadas *seepage hollows* na literatura.

- (5) formação e colapso de caneluras desenvolvidas na cabeceira e nas paredes em função do escoamento superficial, sub-superficial e do impacto da precipitação. Este processo é denominado *fluting* na literatura (e.g. Crouch e Blong, 1989: 295; Brooks *et al.*, 2009: 1963);
- (6) formação de fracturas, tipicamente uma dezenas de centímetros a montante dos limites superiores das paredes e da cabeceira, associadas à libertação da tensão originada pelo desnível sobre a massa de material, e possivelmente por tensões associadas a ciclos de humedecimento/dessecação do solo (Collison, 2001: 10; Oostwoud Wijdenes e Bryan, 2001: 930). Estas discontinuidades diminuem o comprimento do plano de ruptura tangencial, favorecem a infiltração, e podem originar pressões intersticiais positivas quando preenchidas por água, contribuindo para a instabilidade (Bull e Kirkby, 1997: 363). A sua ocorrência é promovidas pelas formas de sapamento basal referidas em (1), (2) e (4);
- (7) acumulação, nos fundos, de material destacado das paredes e da cabeceira por ciclos de congelamento/descongelamento e/ou humedecimento/dessecação, e facilmente mobilizado pelo escoamento (Prosser *et al.*, 2000);
- (8) redução da resistência tangencial do rególito nas paredes e cabeceiras devido ao aumento das discontinuidades e da porosidade resultantes da deformação do material em associação a ciclos de congelamento/descongelamento (Thomas *et al.*, 2009).

Estes sub-processos podem combinar-se de diferentes formas para remover material da cabeceira e das paredes de ravinas, sendo estes movimentos de massa fortemente influenciados pelas condições hidrológicas do material. Bocco (1991: 400) propõe que a importância das condições hidrológicas nos processos de ravinamento torna relevante considerar a humidade antecedente e a quantidade de precipitação como variáveis climáticas críticas, para além da sua intensidade (associada à geração de escoamento superficial erosivo). Bull e Kirkby (1997: 363) referem que, num contexto em que as fracturas de tensão ocupem uma parte significativa da altura das paredes, a evolução pode ocorrer por balançamento (*toppling*) de porções da parede, sendo neste caso a força ténisil do rególito o factor crítico. Bradford e Piest (1980: 88) descreveram um processo semelhante na evolução das cabeceiras em ravinas de fundo de vale (que denominaram *slab failure*), salientando adicionalmente a força compressiva do solo sob a porção da cabeceira destacada pelas fracturas de tensão: o balançamento terá lugar quando a massa desta última ultrapassa a força do solo.

O balançamento também é associado por Collison (2001: 12) à acção conjunta de fracturação e sapamento intensos, podendo ocorrer sem que se dê saturação do solo com água. Este autor propôs um processo cíclico de recuo de cabeceiras assente na combinação entre fracturas de

tensão, sapamento basal e escoamento sub-superficial, e também aplicável às paredes de canais (Figura 6).

Outras combinações de processos descritas na literatura incluem o *fluting* como motor do sapamento de uma camada sobrejacente e principal factor de recuo de cabeceiras (Vandekerckhove *et al.*, 2000b: 45), ou a formação de fracturas de tensão acima da cabeceira como processo promotor da formação e colapso de tubos (Harvey, 1982: 321; Martín-Penela, 1994: 218).

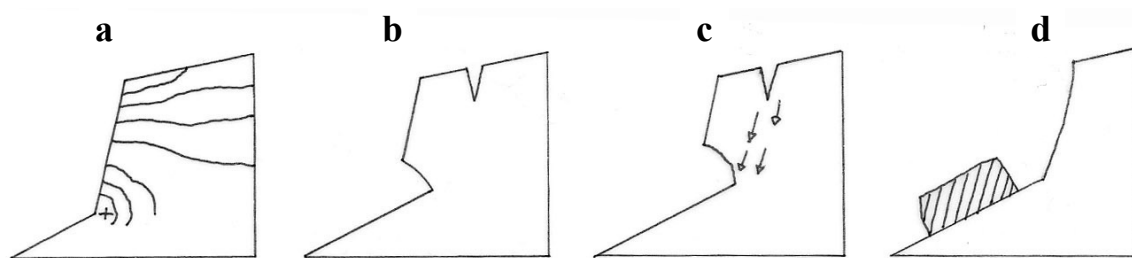


Figura 6 – Ciclo hipotético de recuo de cabeceiras proposto por Collison (2001). As linhas contínuas em (a) representam planos de igual tensão tangencial no perfil da cabeceira, sendo o máximo (+) atingido junto à base. Após uma primeira fase, em que a libertação de tensões resultante da incisão (a) origina as fracturas e a sapa (b), a infiltração é promovida pelas primeiras, originando uma aceleração do escoamento sub-superficial (c), cujo afloramento se dá na base da cabeceira, dinamizando o sapamento e potencialmente a tubulação. Em condições de precipitação suficiente, as pressões intersticiais positivas resultantes do preenchimento das fracturas com água reduzirão a coesão do material ao ponto de provocar o colapso, ao longo de um plano de ruptura tangencial definido entre as fracturas e a sapa basal (d). Escoamento posterior no canal remove o material depositado, possibilitando o recomeçar do ciclo. Figura adaptada a partir de Collison (2001: 11).

A complexidade resultante de todos os sub-processos acima referidos dificulta a consideração dos movimentos de massa no contexto do ravinamento em termos de um balanço entre força e tensão tangencial (como ocorre no cálculo do *Factor de Segurança*, cf. Morgan, 2005: 37⁶⁵). Não só a tensão relevante é frequentemente de natureza têsnil, por oposição a tangencial (Bull e Kirkby, 1997: 363), como a configuração estrutural dos tubos dificilmente permitiria que o seu colapso fosse adequadamente considerado em termos de um só plano de ruptura. A variedade e complexidade descritas contribuem certamente para a atenção relativamente modesta que os movimentos de massa têm recebido na literatura, em benefício do escoamento (Bocco, 1991: 400).

⁶⁵ $F = \frac{\sigma}{\tau}$, em que σ é a resistência tangencial do material, definida ao longo de um plano de ruptura tangencial, e τ é a quantidade de tensão desenvolvida ao longo do mesmo plano.

Por último, considerou-se adequado finalizar a consideração da relação entre movimentos de massa e ravinamento com uma breve caracterização do fenómeno da tubulação, denominado *piping* na literatura de língua inglesa. Embora tenha sido já várias vezes referido, é no contexto dos movimentos de massa que este processo de erosão sub-superficial atinge maior relevância, exercendo acção tanto no surgimento como no alargamento e bifurcação de ravinas.

4.2.1. A tubulação (*piping*): natureza e factores

Os tubos (*pipes*) podem ser definidos como cavidades lineares originadas pelo fluxo subsuperficial da água em solos ou depósitos não consolidados (Jones, 2004: 784). A sua formação tem lugar numa enorme variedade de contextos naturais e as suas dimensões podem variar grandemente, com exemplos na literatura a incluírem formas centimétricas (Gutiérrez *et al.*, 1997) a métricas (Zhu, 2003).

O seu surgimento e evolução estão associados a dois processos fundamentais. Por um lado, o movimento da água no interior do rególito (não saturado) pode originar pressões intersticiais positivas no local do seu afloramento à superfície (e.g. vertente, terraço agrícola, margem de um canal) provocando liquefacção do material nesse ponto e originando uma conduta que evolui de forma regressiva para o interior do rególito, por vezes formando redes complexas (e.g. Poesen e Govers, 1990: 517; Bryan e Jones, 1997: 210).

Por outro lado, o movimento subsuperficial da água através de uma via preferencial (e.g. fractura, orifício originado por raízes ou animais) pode originar tensões suficientes para mobilizar o material, alargando-a (Jones, 2004: 786). Este segundo processo contrasta com o primeiro na medida em que se dá de montante para jusante, e portanto de forma progressiva por oposição a regressiva. Ambos os processos interagem frequentemente de forma muito complexa, sendo virtualmente impossível isolá-los na prática (Bryan e Jones, 1997: 210). Os seus vários factores de controlo são seguidamente descritos⁶⁶.

Tal como já foi considerado, a erodibilidade do material controla a sua resistência às tensões exercidas pelo escoamento. Embora esta propriedade tenha sido já caracterizada com algum detalhe, serão aqui dados alguns exemplos extraídos da literatura no contexto específico da tubulação. Faulkner (2006: 543) refere como críticas a textura e a quantidade de matéria orgânica, sendo estas as propriedades responsáveis pela elevada susceptibilidade à tubulação

⁶⁶ O primeiro processo constitui o *piping* no sentido restrito, enquanto o segundo é mais adequadamente designado de *tunneling* na literatura. Dada a complexidade inerente à distinção dos dois em contextos naturais, o termo *piping* é utilizado de forma generalizada para incluir ambos.

dos solos de *loess* do norte da Europa: a textura acentuadamente limosa e a reduzida percentagem de argila (enquanto agente de agregação) levam a que o material seja rapidamente removido em vias de escoamento preferencial existentes, levando ao alargamento destas. O teor reduzido em matéria orgânica é referido pela mesma autora como um dos factores por detrás da tubulação em contextos mediterrânicos e semi-áridos no sul da Europa, através da promoção de uma fraca estruturação do solo. Por último, uma reduzida densidade específica promove a formação rápida de tubos pela água de infiltração. Este é, de acordo com Borselli *et al.* (2006: 653) o factor por detrás da intensa tubulação que se segue a acções de regularização mecânica da topografia levadas a cabo com diversos propósitos (e.g. facilitação da mecanização agrícola, reclamação de áreas severamente erodidas, terraceamento). A mesma relação densidade-tubulação caracteriza depósitos resultantes de movimentos de massa no interior de canais (Martín-Penela, 1994: 217; Faulkner, 2006: 553).

A existência de descontinuidades no substrato onde o movimento da água tem lugar é universalmente aceite como um factor de controlo fundamental, através do papel exercido na infiltração e concentração do escoamento. Estas descontinuidades podem ser de origem tectónica ou uma consequência da tensão exercida pela própria massa do material (i); podem ser o resultado de ciclos de humedecimento/dessecação⁶⁷ (fracturas de dessecação) (ii); ou macro-poros resultantes da acção das raízes ou de animais (Faulkner, 2006: 552) (iii).

No primeiro caso, Harvey (1982) descreveu a associação entre tubulação e ravinamento em camadas espessas de siltes no SE semi-árido de Espanha: o aprofundamento dos entalhes origina paredes com um carácter vertical nas quais tem lugar a formação de fracturas de tensão, depois ocupadas por tubos cujo colapso eventual conduz à expansão da rede. Slaymaker (1982: 310) associou descontinuidades verticais em depósitos espessos de siltes na Colúmbia Britânica à formação de tubos verticais. No contexto das relações entre fracturação, tubulação e ravinamento, a existência de descontinuidades profundas (e.g. tectónicas) promoverá o desenvolvimento de sistemas de ravinas de grandes dimensões, o oposto acontecendo com descontinuidades superficiais (Martín-Penela, 1994: 218).

No segundo caso, a fracturação é frequentemente promovida pela presença de argilas expansivas (e.g. esmectites), sendo neste caso a duração do período entre episódios de precipitação um factor adicional de controlo (op.cit.). O escoamento eventual acaba por seleccionar e erodir preferencialmente as fracturas orientadas de montante para jusante,

⁶⁷ Embora não tenha sido encontrada qualquer referência específica na literatura, também é plausível que fracturas resultantes da expansão da água em função de ciclos congelamento/fusão exerçam um efeito análogo.

mantendo-as abertas sub-superficialmente mesmo que a expansão posterior do rególito as feche à superfície (Jones, 2004: 786).

Exemplos de fracturação resultante de humedecimento/dessecação sem qualquer associação ao teor em argila são a que tem lugar nos solos de *loess* do Norte da Europa em função dos contrastes na densidade do material em condições húmidas e secas, por sua vez resultado da textura limosa e do reduzido teor em matéria orgânica enquanto agente agregador (Faulkner, 2006: 543); e a que ocorre em solos orgânicos do Norte da Europa (histossolos segundo a classificação da FAO), e.g. Jones *et al.* (1997)

É importante referir que a simples existência de argilas expansivas não implica necessariamente tubulação na ocorrência de episódios de precipitação: Faulkner (2006: 547) refere que na presença de teores de argila muito elevados, o processo pode mesmo ser inibido pela redução da permeabilidade resultante da expansão rápida do material, progredindo a partir da superfície.

A existência de condições dispersivas é outro factor universalmente associado à tubulação, exercendo efeito em contextos semi-áridos onde a infiltração é insuficiente para remover significativamente as bases do perfil do rególito, em particular o sódio, e.g. E, SE e NE de Espanha (respectivamente Donker e Damen, 1984; Martin-Penela, 1994; Gutiérrez *et al.*, 1997), Marrocos ou Austrália (ambos referidos por Imeson e Kwaad, 1980). A natureza monovalente e o raio iónico relativamente elevado do catião sódio quando hidratado fazem com que sejam necessárias grandes quantidades destes iões para contrabalançar a carga predominantemente negativa dos colóides do solo. Ao substituir catiões divalentes (e.g. Ca, Mg) no complexo de troca, o Na origina uma camada espessa, distanciando as superfícies coloidais entre si o suficiente para eliminar as ligações de van der Waals que as mantinham inicialmente coesas. A repulsão recíproca entre os próprios catiões Na também contribui para manter as partículas coloidais num estado disperso (Brady e Weil, 2008: 422). No contexto da tubulação, o resultado é o alargamento rápido das vias sub-superficiais para o escoamento através da remoção do material disperso, facilmente mobilizável.

Tal como foi já referido com relação ao efeito condicional das argilas expansivas, também a presença de condições dispersivas não implica necessariamente a ocorrência de tubulação. Caso a quantidade de Na no complexo de troca seja muito elevada, a dispersão pode ser completa ao ponto de reduzir a permeabilidade abaixo de um nível mínimo, ao mesmo tempo eliminando a estrutura do solo de forma a rapidamente preencher quaisquer vias preferenciais para o escoamento que se originem (Jones, 2004: 787). Ao mesmo tempo, a dispersão da camada superficial pode promover (juntamente com o impacto mecânico das gotas de água e

a fragmentação dos agregados com o humedecimento) um selo de permeabilidade muito reduzida, promovendo o escoamento à superfície e não a infiltração, essencial à formação de tubos⁶⁸. Estes contrangimentos implicam que a tubulação apenas será promovida ao máximo na presença de um conteúdo relativamente reduzido em argilas, suficiente para que a sua dispersão condicione a agregação do restante material, mas insuficiente para afectar as taxas de infiltração (Faulkner, 2006: 548). Por outras palavras, a distribuição das diferentes classes granulométricas (para além da mineralogia das argilas presentes) controla significativamente o efeito da dispersividade sobre a tubulação.

Um quarto factor de controlo é a existência de contrastes nas propriedades do rególito, tanto em termos de comportamento hidrológico como mecânico. Especialmente salientada na literatura é a sobreposição de material relativamente permeável a uma camada relativamente impermeável (e.g. Imeson e Kwaad, 1980: 434; Slaymaker, 1982: 311; Jones, 2004: 786). Esta situação tende a produzir dois resultados, ambos promotores da tubulação. Em primeiro lugar, o escoamento infiltrado a partir da superfície tende a concentrar-se no plano de transição entre ambos os materiais, originando e alargando cavidades à medida que se desloca ao longo deste. Neste contexto, Drew (1982: 304) estudou uma área de *badlands* na Colúmbia Britânica, propondo uma sequência de desenvolvimento de tubos controlada pela presença e inclinação de camadas relativamente argilosas a partir do ponto em que são atingidas pela percolação proveniente da superfície. Verachtert *et al.* (2010: 345) estabeleceram na Bélgica uma relação entre tubulação e a sobreposição de uma cobertura superficial de *loess* (textura limosa) a uma camada rica em esmectites.

Em segundo lugar, e caso as argilas sejam de natureza expansiva, os comportamentos mecânicos diferenciados dos dois materiais sobrepostos tenderão a produzir relativamente mais fracturas de dessecação na camada (mais argilosa) subjacente, posteriormente preenchidas e alargadas pela água de infiltração (Faulkner, 2006: 547). O contraste nas erodibilidades dos materiais presentes face à acção erosiva da água também exerce efeitos importantes: Harvey (1982) descreveu no SE de Espanha a formação de tubos em adjacência a veios de gesso em material siltoso e margoso, associando no mesmo trabalho a tubulação à ocorrência de siltes relativamente erodíveis sob depósitos de gravilha cimentados, e a siltes não consolidados subjacentes a uma camada superficial encrostada (relativamente mais resistente). Nestas situações, é natural que a protecção conferida pela camada superior

⁶⁸ O processo de selagem superficial do solo foi já considerado no contexto do controlo exercido pela estabilidade dos agregados sobre a infiltração em 4.1.1.4.

promova o crescimento de tubos de grandes dimensões antes do seu colapso, promovendo desde logo o surgimento de ravinas num nível avançado de desenvolvimento.

A topografia constitui outro importante factor de controlo sobre a formação de tubos, exercendo a sua acção de duas formas: (i) através da distribuição espacial dos gradientes hidráulicos, definindo a intensidade do escoamento sub-superficial, e (ii) através da influência sobre a infiltração e conseqüentemente a água disponível para exercer acção erosiva sub-superficial.

No primeiro contexto, a tubulação tem sido associada tanto a topografia côncava, conducente à concentração do escoamento (Verachtert *et al.*, 2010: 343) como a topografia convexa, que Faulkner (2006: 552) define como um factor crítico em função dos gradientes hidráulicos acentuados. As chamadas ravinas de desnível (vd. Cap. 3) estão particularmente associadas a estas convexidades na forma de quebras na topografia, sejam estas terraços agrícolas (Martín-Penela, 1994: 212) ou margens de canais (Poesen e Govers, 1990: 517), incluindo outras ravinas (Harvey e Gutiérrez-Elorza, 2005: 58). No caso particular dos terraços, o processo é acentuado pela porosidade aumentada pela mobilização do solo, promovendo um escoamento subsuperficial mais rápido (Martín-Penela, 1994: 218; Borselli *et al.*, 2006: 653).

No que diz respeito à infiltração, a topografia exerce controlo através da relação entre declive e velocidade do escoamento, já que declives muito acentuados tenderão a favorecer o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Como exemplo, Verachtert *et al.* (2010) analisaram 560 tubos no Oeste da Bélgica, constatando que 90% do conjunto esteve associado a declives entre 8° e 24° e sugerindo que, acima deste último valor crítico, a infiltração reduzida condiciona a tubulação na área estudada. No planalto de loess do Norte da China, Zhu (2003: 522) observou uma tendência para a ocorrência de ravinas nos declives mais acentuados e de tubos em topografia mais suave, o que parece estar relacionado com o mesmo factor.

Por último, é importante considerar a relação entre coberto vegetal e tubulação. Para além do seu efeito promotor da infiltração, a vegetação protege o solo do impacto da precipitação (que frequentemente origina selos superficiais de permeabilidade reduzida). Neste sentido, contribui para a tubulação, levando potencialmente ao surgimento súbito de ravinas aquando do colapso de tubos desenvolvidos sob vertentes bem vegetadas (Faulkner, 2006: 537; Verachtert, 2010: 343). É possível, porém, que a ausência de vegetação promova igualmente a tubulação no caso específico de um rególito rico em argilas expansivas: nestes casos, a reduzida permeabilidade promoverá um escoamento superficial abundante, para o qual as

fracturas de dessecação constituirão uma via de infiltração privilegiada (Martín-Penela, 1994: 218; Gutiérrez *et al.*, 1997: 252).

5. Padrões de desenvolvimento

5.1. Ciclos e fases de evolução

A noção de que as ravinas tendem a apresentar taxas de crescimento progressivamente menores, tendendo a estabilizar com o tempo, está bem estabelecida na literatura (e.g. Poesen *et al.*, 2003: 115; 2006: 524; Morgan, 2005: 34). Wells *et al.* (1991: 193), com base em observações em Madagáscar, propuseram um ciclo de desenvolvimento em cinco fases no qual, após uma fase de surgimento (1), uma fase de aprofundamento, regressão, e expansão lateral (2) é seguida da quase suspensão dos processos erosivos (3), revegetação, colúviação e suavização dos declives (4), e estabilização final, com as ravinas constituindo apenas concavidades planares na topografia (5). Este ciclo é em grande parte semelhante àquele proposto por Ireland *et al.* (1939, cit. por Bocco, 1991: 395) na Carolina do Sul (E.U.A.), sendo este último marcado pelo contraste na erodibilidade dos horizontes do solo. Caracteriza-se por uma fase inicial de entalhe, atravessando o horizonte A e parcialmente o B (1), uma fase intensa de entalhe e regressão da cabeceira, começando quando o horizonte C (facilmente erodível) é atingido (2), uma fase de reajustamento (3), em que movimentos de massa e enchimento coluvial suavizam o perfil do canal, e uma fase de estabilização (4), marcada pelo estabelecimento da vegetação.

A noção, comum a ambos os ciclos, de uma fase de erosão intensa logo após o surgimento, seguida de um período de estabilização progressiva, é corroborada por diferentes estudos quantitativos da evolução de ravinas ao longo de vários anos. As dimensões (área, comprimento ou volume) têm sido observadas como ajustando-se a funções exponenciais negativas do tempo desde o surgimento da ravina (Graf, 1977; Rutherford *et al.*, 1997; Sidorchuk, 1999; Nachtergaele *et al.*, 2002a; Thomas *et al.*, 2004; Nyssen *et al.*, 2006), do tipo:

$$D = a(1 - e^{-bT})$$

em que D é a dimensão considerada (volume, comprimento, área), T é o tempo desde o surgimento, e a e b são constantes, sendo b denominada constante de decaimento. Radoane *et al.* (1995: 144) observaram na Roménia a evolução de 38 ravinas ao longo de 14 anos, descrevendo um padrão semelhante.

Nachtergaele *et al.* (2002a: 233) explicaram este padrão evolutivo com a diminuição do poder erosivo do escoamento, observando ao longo de 13 anos que a diminuição do produto entre área de drenagem e declive (proporcional à potência do escoamento ou *stream power*), medido na cabeceira, apresentou uma tendência igualmente exponencial. Ao longo do tempo, o escoamento deixará de possuir a energia necessária para remover o material proveniente de jusante ou destacado por movimentos de massa, sendo a colúviação acentuada pela vegetação que entretanto se instala.

A noção de uma evolução exponencial assenta, porém, nos pressupostos de que (1) os processos evolutivos são os mesmos em todas as ravinas, e (2) os factores de controlo destes processos evoluem sempre da mesma forma ao longo do tempo. Em contraste, Nyssen *et al.* (2006: 181) estudaram na Etiópia o padrão evolutivo de um conjunto de ravinas, observando uma tendência sigmoïdal: a intensificação da degradação foi associada a mudanças no uso do solo (favorecendo o escoamento erosivo), e à ocorrência de um período relativamente seco (reduzindo a protecção conferida pela vegetação). Na Nova Zelândia, Parkner *et al.* (2006) estudaram a evolução de numerosas ravinas ao longo do período 1939-2003, definindo fases de expansão e inactividade abrangendo intervalos de vários anos, e explicadas com modificações do coberto vegetal e a ocorrência de episódios de precipitação intensa. Vanwallegem *et al.* (2005b) estudaram a estratigrafia de uma antiga ravina entalhada em *loess* na Bélgica, definindo quatro ciclos de entalhe e enchimento estendendo-se ao longo de menos de cem anos. Estes resultados acentuam a simplificação inerente à concepção do ravinamento como um processo contínuo e unidireccional.

Ao mesmo tempo, a explicação da evolução das formas com recurso à área de drenagem e ao declive, conforme proposta por Nachtergaele *et al.* (2002a: 233), assenta em dois pressupostos que não se verificam necessariamente: (1) que a área de drenagem exerce um controlo significativo sobre o escoamento superficial, e (2) que este controla fundamentalmente os processos erosivos. Em contraste, Thomas *et al.* (2004) estudaram o comportamento hidrológico e o crescimento de uma ravina ao longo de 36 anos, observando que embora a área de drenagem tenha diminuído 8% durante o período, a taxa de crescimento (em comprimento) diminuiu por mais do que um factor de 20 (*op.cit.*: 1006). Esta disparidade levou à conclusão que a diminuição da taxa de crescimento observada resultou de uma diminuição significativa verificada no escoamento directo⁶⁹ e do aumento verificado no

⁶⁹ A diminuição do escoamento directo não resultou da diminuição da área de drenagem da ravina, já que a estação de medição esteve localizada numa posição a jusante desta, não tendo havido alteração na área de drenagem abarcada pelas medições. As alterações hidrológicas foram atribuídas a diferentes causas potenciais

escoamento de base. Como resultado, uma drenagem sub-superficial aumentada na base das paredes veio promover os movimentos de massa⁷⁰ e o escoamento superficial mostrou-se insuficiente para remover o material depositado (promovendo a suavização do declive da ravina e a sua estabilização).

No SE de Espanha, Seeger *et al.* (2009) estudaram duas ravinas de desnível ao longo de 4 e 11 anos, respectivamente, observando que o controlo exercido pela tipologia e distribuição do coberto vegetal sobre a produção de escoamento se sobrepôs à influência da área de drenagem. Embora a ravina mais dinâmica possuísse menos de metade da área de drenagem da outra, a sua cabeceira apresentou, durante dois anos particulares, uma taxa de regressão aproximadamente 98 vezes superior⁷¹.

Uma evidente objecção aos dois pressupostos acima enumerados é a existência de ravinas que evoluem até ocuparem toda a vertente ou toda a sua área de drenagem inicial, podendo mesmo ultrapassar os limites desta (e.g. Wells *et al.*, 1991: 202). De Rose *et al.* (1998) descrevem grandes sistemas de ravinas em anfiteatro na Nova Zelândia que ocupam virtualmente toda a área de drenagem da sua desembocadura, associando o seu desenvolvimento à associação entre escoamento e movimentos de massa. Bacellar *et al.* (2005: 1379) associaram a formação de grandes ravinas, estendendo-se frequentemente até ao alto das vertentes, à ocorrência de um aquífero confinado por um estrato de argila: a ocorrência de elevadas pressões intersticiais faz com que, a partir do ponto em que o estrato confinante seja entalhado, o saprólito subjacente se torne muito susceptível à tubulação e a movimentos de massa, levando a uma evolução na qual o escoamento superficial é apenas um dos factores.

5.2. Uma relação dinâmica entre processos: escoamento e movimentos de massa

Ao longo do desenvolvimento de uma ravina, a importância relativa de diferentes processos sofre variações. Betts *et al.* (2003: 1054) propuseram, para uma área de estudo na Nova Zelândia, que as ravinas incipientes evoluem essencialmente por processos de incisão fluvial. Porém, a partir de um limiar crítico - possivelmente controlado pela resistência tangencial e declive das paredes e pela profundidade do entalhe - começam a expandir-se lateralmente

(e.g. perturbação da vegetação e maior frequência de eventos de precipitação intensa promovendo o escoamento directo numa fase inicial).

⁷⁰ O escoamento de base correlacionou-se positivamente com a largura do canal e negativamente com o declive das paredes, evidenciando o seu papel na ocorrência de movimentos de massa.

⁷¹ Durante o período de 4/2002 a 4/2004, a taxa de recuo da cabeceira foi de 6,87 m².ano⁻¹, por oposição a 0,07 m².ano⁻¹ (op.cit.: 421).

através de colapsos⁷². Os movimentos de massa adquirem então uma importância crescente, acabando por tornar-se a principal fonte de sedimentos, e o escoamento passa a ter sobretudo a função de remover este material do canal, permitindo a sua expansão (Morgan, 2005: 34).

Blong *et al.* (1982: 385) descreveram um padrão semelhante na Austrália. Estudando especificamente os processos laterais, observaram que embora estes só possam começar a agir depois da formação de um desnível suficiente, podem ser responsáveis por mais de metade do sedimento produzido. Martínez-Casnovas *et al.* (2003: 455) observaram que, ao longo de vinte anos, a maioria do material gerado pelo sector de cabeceira de um grande sistema de ravinas teve origem em movimentos de massa nas paredes.

A ideia de um aumento na importância relativa dos movimentos de massa é também corroborada pelo facto de, no contexto do modelo exponencial negativo já descrito, as taxas de decaimento serem menores para a área do que para o comprimento ou o volume da ravina (e.g. Nachtergaele *et al.*, 2002a: 232). Esta relação sugere que, com a evolução, o alargamento associado aos movimentos de massa continua a ocorrer a uma taxa relativamente elevada quando o recuo da cabeceira (predominantemente associado à acção do escoamento) diminui⁷³.

Esta variação na importância relativa dos processos constitui uma diferença adicional entre o ravinamento e a sulcagem, na qual o escoamento concentrado é invariavelmente o factor determinante (e.g. Imeson e Kwaad, 1980: 430; Nearing *et al.*, 1997; Giménez e Govers, 2002; Yao *et al.*, 2008).

Abordando a ravina em desenvolvimento como um *sistema geomórfico* (conforme proposto por Bocco, 1991: 403), a evolução acima descrita implica a transição entre uma primeira fase, em que a resposta do sistema à drenagem superficial é directa, para uma segunda fase em que esta resposta é condicionada pela disponibilização de material através de movimentos de massa. No seu estudo de uma ravina ao longo do período 1964-2000, Thomas *et al.* (2004: 1006), observaram que, anualmente, a eficiência erosiva do escoamento⁷⁴ não foi máxima no mês de maior volume de escoamento, mas subiu drasticamente no mês com maior frequência

⁷² Para além da influência *directa* exercida sobre o equilíbrio entre resistência e tensão, o aprofundamento da ravina promove a drenagem sub-superficial em função do gradiente hidráulico acentuado, contribuindo também *indirectamente* para a ocorrência de movimentos de massa ao promover a formação de tubos (e.g. Okagbue e Uma, 1987: 166).

⁷³ É de salientar que a utilização do comprimento não permite diferenciar o recuo da cabeceira causado pelo escoamento do recuo causado por movimentos de massa. Se apenas o primeiro fosse considerado, o decaimento da taxa de aumento do comprimento seria, expectavelmente, ainda maior.

⁷⁴ A eficiência erosiva do escoamento é a razão entre a potência de escoamento necessária para mover o sedimento removido num dado período, e a potência possuída pelo escoamento verificado nesse período. A formulação é apresentada em Thomas *et al.* (2004: 1005).

de movimentos de massa, atingindo o seu pico no mês a seguir (ainda um mês antes do escoamento máximo). De forma análoga, Hicks *et al.* (2003: 1138) observaram que, em média, metade dos sedimentos removidos em suspensão de uma sub-bacia fortemente ravinada na Nova Zelândia estão associados a eventos de precipitação com períodos de retorno inferiores a um ano, atestando o papel dos movimentos de massa como mecanismo de fornecimento de material facilmente mobilizável. Um exemplo extremo deste controlo é dado por Vandekerckhove *et al.* (2003: 346) e Marzoff e Ries (2007: 421): no Sudeste semi-árido de Espanha, uma ravina pode manter-se inactiva durante anos enquanto tubos alargam e fracturas de tensão se desenvolvem, evidenciando actividade considerável apenas quando um evento crítico despoleta colapsos na cabeceira e paredes.

A natureza episódica dos movimentos de massa e a sua resposta não linear à precipitação colocam em causa a definição do ravinamento como um processo inerentemente hídrico e comprometem a sua modelação, pelo menos à escala sazonal, com recurso a variáveis que traduzem apenas a erosividade do fluxo (e.g. potência do escoamento, tensão tangencial) (Prosser *et al.*, 2000: 1098; Thomas *et al.*, 2004: 1007). Collison (2001: 3) propôs mesmo que, no caso do ravinamento, um modelo tradicional de erosão do tipo:

$$\text{Erosão} = f(\text{erosividade, erodibilidade})$$

deveria ser modificado para:

$$\text{Erosão} = f(\text{resistência da cabeceira e paredes, tensão tangencial na cabeceira e paredes, erosividade, erodibilidade})$$

5.3. Limiares geomórficos

As interacções entre os processos que conduzem o ravinamento e as suas variáveis de controlo tornam evidente que o comportamento destas formas está sujeito a limiares, a partir dos quais se modifica. Schumm (1979) propôs o conceito de *limiar geomórfico*, dando como exemplo da sua aplicação o estudo do surgimento de ravinas em fundos de vale com recurso à área de drenagem e ao declive, de forma análoga aos limiares topográficos já referidos. O conceito foi definido como *um limiar de estabilidade numa forma do relevo que é excedido por uma mudança intrínseca da própria forma, ou por uma mudança progressiva de uma variável externa* (op.cit.: 488). Em ordem a abranger todos os processos do ravinamento, torna-se necessário alargar a definição original para incluir mudanças *súbitas* de variáveis externas.

No que diz respeito ao ultrapassar de limiares extrínsecos, numerosos exemplos podem ser dados, mais frequentemente levando à intensificação da erosão: desflorestação (De Rose *et al.*, 1998; Gábris *et al.*, 2003); mudança da cultura agrícola (e.g. conversão para cultivo da amendoeira, cf. Oostwoud Wijdenes *et al.*, 2000: 165; para vinha, cf. Martínez-Casanovas *et al.*, 2004: 308); eventos ou períodos extremos de precipitação (Dotterweich *et al.*, 2003: 149; Stankoviansky, 2003: 237); construção de valas de drenagem ou estradas (Nyssen *et al.*, 2002; Valcárcel *et al.*, 2003); colapso de tubos (e.g. Martín-Penela, 1994: 211), movimentos de vertente (Alexander, 1982: 71; Menéndez-Duarte *et al.*, 2007: 273), ou o aumento da densidade do gado ao longo do tempo, promovendo o pisoteio e a diminuição da vegetação (Boardman *et al.*, 2003: 182; Gutiérrez *et al.*, 2010: 542). Um exemplo de um limiar extrínseco ultrapassado com o resultado oposto é a florestação de uma área ravinada, levando à estabilização das formas sem que chegue a ocorrer enchimento (Vanwalleghem *et al.*, 2003: 28).

Limiares intrínsecos são atingidos, por exemplo quando uma ravina em desenvolvimento atinge um material mais resistente que condiciona o seu crescimento e/ou orientação (e.g. Bacellar *et al.*, 2005: 1378; Nachtergaele *et al.*, 2002a: 227) ou menos resistente, acelerando a degradação (e.g. Ireland *et al.*, 1939; Morgan e Mngomezulu, 2003: 405). Dependendo da estratigrafia da bacia em consideração, estes limiares podem ser sucessivamente atingidos à medida que uma mesma ravina de fundo de vale progride para montante, entalhando rególitos com diferentes propriedades (Bradford e Piest, 1980: 92).

A já abordada transição entre uma fase dominada por processos fluviais e outra parcialmente controlada por movimentos de massa é outro exemplo de um limiar geomórfico intrínseco (Betts *et al.*, 2003: 1054).

6. Discussão: para um enquadramento teórico coerente

Ficou patente até este ponto que uma ravina pode originar-se em diferentes contextos topográficos, como resultado directo da acção erosiva do escoamento, mas também quando este ocupa a depressão deixada por um movimento de massa (e.g. colapso de tubo, deslizamento). A partir do seu surgimento, a forma pode ser sujeita a uma evolução mais ou menos descontínua, controlada por diferentes processos, e sujeita a uma ou mais fases de degradação e agradação, cuja sucessão é marcada pelo ultrapassar de limiares. Eventualmente, a agradação pode ser suficiente para produzir uma forma suavizada e estável face ao contexto ambiental, cujas dimensões são insuficientes para que seja (arbitrariamente) considerada

ravina. Esta estabilização marca o fim do seu ciclo de desenvolvimento, não invalidando que, na existência das condições apropriadas, outro entalhe venha posteriormente a ocupar o mesmo local.

De forma oposta, porém, a dinâmica erosiva pode revelar-se intensa e/ou prolongada o suficiente para que a forma se expanda até ocupar toda a sua área de drenagem inicial, podendo mesmo ultrapassar os seus limites.

A acção do escoamento é o factor por detrás da já referida concepção prevalecente da ravina como estágio intermédio num *continuum* de formas fluviais (Grissinger, 1996; Poesen *et al.*, 2003, 2006). Esta noção foi reforçada pelos resultados obtidos por Nachtergaele *et al.* (2002b). Comparando seis conjuntos de dados de diferentes proveniências, os autores observaram que sulcos, ravinas (efémeras) e canais de (pequenos) rios podem ser descritos através de relações empíricas entre a largura do canal (W , em m), e o caudal que registam (Q , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), do tipo:

$$W = aQ^b$$

sendo a e b constantes. O expoente b variou, em média, entre 0.3 (sulcos), 0.4 (ravinas) e 0.5 (canais de pequenos rios)⁷⁵.

A continuidade que estes resultados sugerem⁷⁶ não é, porém, compatível com a variabilidade morfológica verificada entre as formas de maiores dimensões, frequentemente caracterizadas pelo alargamento e desenvolvimento de múltiplas cabeceiras. Nestes casos, a evolução não depende apenas do escoamento, mas sim da conjugação entre este (como mecanismo de remoção do material depositado) e os movimentos de massa (alargando os canais e disponibilizando sedimentos de forma episódica). A importância destes processos laterais está implícita na noção de que as ravinas nunca são totalmente preenchidas pelo escoamento, mesmo quando registam caudais mais elevados (e.g. Imeson e Kwaad, 1980: 430; Prosser *et al.*, 2000: 1086). Exemplos são observáveis em Oostwoud Wijdenes e Bryan (2001), Morgan e Mngomezulu (2003), Marzloff e Ries (2007) ou Brooks *et al.* (2009). Adicionalmente, as ravinas ocorrem com frequência organizadas em sistemas hierárquicos que apenas raramente foram em si objecto de estudo (e.g. Donker e Damen, 1984), sendo mais habitual a consideração de formas individuais (ordem 1 ou 2) mesmo que neles integradas (e.g. Vandekerckhove *et al.*, 2000b). Dois tipos fundamentais de sistemas de ravinas poderiam ser

⁷⁵Os autores sugeriram três possíveis factores de causa para a diferença de expoentes: (1) diferenças na distribuição da tensão tangencial ao longo do perímetro molhado entre canais de diferentes dimensões; (2) maior probabilidade de o canal atingir um material relativamente pouco erodível (alargando-se) em canais de maiores dimensões; (3) declive médio (i.e. capacidade potencial para a incisão) inferior em canais de maiores dimensões.

⁷⁶A assunção desta continuidade está patente no uso da expressão “erosão linear” para abranger sulcos e ravinas (e.g. Chaplot *et al.*, 2005).

distinguidos utilizando como critério de diferenciação as características dos interflúvios entre canais individuais. Nos sistemas em rede (Fig.7-a), os canais e as respectivas cabeceiras estão relativamente mais afastados e são separados por porções não entalhadas da superfície topográfica envolvente, i.e. a superfície entre canais é a continuação da superfície exterior à rede (e.g. Donker e Damen, 1984; Martínez-Casanovas *et al.*, 2004). Nos sistemas em complexo (Fig. 7-b), os canais são separados por interflúvios estreitos e de altitude inferior à da superfície topográfica exterior ao complexo, ou seja, os próprios interflúvios resultam da degradação da superfície topográfica original. Este é o caso das formas de grandes dimensões adequadamente denominadas “complexos de ravinas de flúvio-movimentação de massa”⁷⁷ por Betts *et al.* (2003).

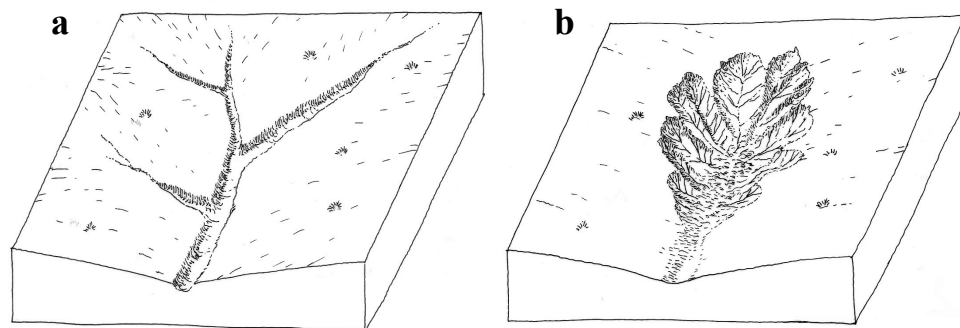


Figura 7 – Sistemas de ravinas. (a) em rede; (b) em complexo.

Dada a incapacidade da concepção vigente de ravina para unificar a literatura, com consequências inevitáveis nas questões de investigação definidas e na coerência e utilidade do conhecimento resultante, torna-se necessário adoptar uma nova abordagem conceptual, encarando cada ravina ou sistema de ravinas, para uma dada escala temporal, como uma conjugação entre morfologia, processos, e os factores de controlo destes últimos. As relações entre estes três elementos variarão ao longo do tempo, sendo a morfologia simultaneamente o resultado dos processos (Heede, 1970), e a sua causa. Face a este carácter dinâmico, o conceito de limiar geomórfico (Schumm, 1979) tem um papel estruturante: para cada ambiente de formação/evolução haverá limiares a partir dos quais se dão transições na natureza e importância dos processos activos (e.g. escoamento, movimentos de massa, tubulação), na dinâmica dominante (e.g. aprofundamento, alargamento, assoreamento, bifurcação), e na intensidade desta dinâmica. O conhecimento destes limiares (e.g. limiar de profundidade conducente à intensificação dos movimentos de massa) pode permitir definir fases características de evolução de uma forma objectiva, permitindo a comparação dos

⁷⁷ *Fluvio-mass movement gully complexes* no original.

resultados de estudos incidindo sobre formas em ambientes diferentes, mas fases de desenvolvimento (i.e. conjugações de morfologia e processos) semelhantes.

Ao contrário da abordagem fluvial que tem dominado a literatura, o enquadramento conceptual proposto permite abranger o ravinamento em toda a sua expressão, incluindo a dinâmica dos sistemas de formas (em rede e complexos). As redes só muito raramente foram consideradas (Donker e Damen, 1984), e os complexos têm sido alvo de estudos procurando quantificar o seu crescimento ao longo de um período e relacioná-lo com diferentes factores (e.g. DeRose *et al.*, 1998; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2003), mas só raramente dando atenção às mudanças nas relações forma-processo que assistem ao seu surgimento a partir de formas incipientes (e.g. Betts *et al.*, 2003).

Se o desenvolvimento de ravinas em rede é um elemento de ligação entre o ravinamento e a geomorfologia fluvial, os complexos adquirem particular significância na medida em que estabelecem a transição entre o ravinamento e a geomorfologia de *badlands*. Apesar dos trabalhos onde são descritas em simultâneo ravinas e áreas de *badlands* a ocorrer no mesmo local (e.g. Boardman *et al.*, 2003; Harvey e Gutiérrez-Elorza, 2005), e dos bem estudados complexos de ravinas existentes em áreas de *badlands* na Península Italiana (localmente designados *calanchi*, e.g. Alexander 1982; Moretti e Rodolfi, 2000; Grove e Rackam, 2001), a importância destas formas intermédias parece não ter ainda sido alvo da devida atenção, existindo um hiato teórico entre os dois campos de estudos.

À luz da variabilidade descrita até este ponto, a maioria das definições de ravina analisadas afigura-se redutora, embora de diferentes formas (Tabela 1): limitam a sua formação à acção do escoamento concentrado (e.g. Zachar, 1982; Ebisemiju e Ekiti, 1989), constroem-na à rede de drenagem (Hancock e Evans, 2006), às vertentes (Kirkby e Bracken, 2009), assumem morfologias que não se verificam necessariamente (e.g. secção em V, cf. Bull e Kirkby, 1997), ou a inexistência prévia de um canal bem definido (Schumm *et al.*, 1984, cit. por DeRose *et al.*, 1998). Embora a definição de Morgan (2005) seja a mais coerente, assenta em parte na morfologia das paredes (declivosas) e não na dinâmica erosiva que lhe está directamente na origem.

De forma a construir uma definição coerente, adaptaram-se as propostas de Schumm *et al.* (1984) e Morgan (2005) e tornou-se explícita a natureza mista (fluvial/gravitacional) do ravinamento, já salientada por Bocco (1991) e por Collison (2001). Considerou-se assim que uma ravina poderá ser genericamente definida como "um canal relativamente fundo, instável e em processo de erosão que evolui através da conjugação entre um escoamento efémero em

contextos de alimentação em precipitação, e movimentos de massa⁷⁸.” O ravinamento é assim implicitamente definido como o fenómeno do surgimento e evolução destes canais, por oposição à definição vigente (Vd. Cap.1), assente em exclusivo na acção do escoamento ao dar origem a canais relativamente incipientes.

Do ponto de vista da aplicação, o enquadramento proposto pode permitir otimizar os custos com medidas de controlo e prevenção, adequando-as à dinâmica presente e futura das ravinas no terreno. Vários exemplos podem ser extraídos da literatura: Morgan e Mngomezulu (2005: 413) observaram na Suazilândia que algumas ravinas resultavam fundamentalmente do escoamento Hortoniano, enquanto outras pareciam estar numa fase mais avançada, sendo controladas pela drenagem sub-superficial na cabeceira. Nesta fase, medidas que favorecem a infiltração são prejudiciais: Nir e Klein (1974: 201) observaram numa área de estudo em Israel que a adopção da lavra segundo as curvas de nível reduziu o escoamento superficial, mas promoveu o escoamento sub-superficial, contribuindo para a tubulação e para a formação e crescimento de ravinas. No NE de Espanha, Martínez-Casanovas *et al.* (2009: 1936) observaram que mudanças no uso do solo aumentaram a cobertura de vegetação nas paredes de grandes ravinas. Ao mesmo tempo, porém, também promoveram a concentração do escoamento superficial na área onde estas se localizam, aumentando o conteúdo de água nas paredes e promovendo o seu recuo por movimentos de massa, não obstante a acção estabilizadora da vegetação. Betts *et al.* (2003: 1057) enfatizaram a importância do conhecimento das fases de evolução, salientando a inutilidade de levar a cabo programas de plantação em ravinas jovens em expansão intensa através de movimentos de massa, e o desperdício de o fazer com formas em estabilização. A mesma ineficiência decorre da aplicação de estruturas de controlo de cabeceiras em ravinas com uma forte dinâmica lateral (Blong *et al.*, 1982: 385). Por último, Oostwoud Wijdenes *et al.* (1999) analisaram as relações entre morfologia da cabeceira, ambiente de formação e estágio de evolução em 59 ravinas no SE de Espanha. Os resultados permitiram propor um modelo evolutivo, no qual cabeceiras inicialmente graduais se tornam progressivamente abruptas à medida que os canais progridem para montante, com um ganho relativo de importância por parte dos movimentos de massa e uma diminuição das taxas de recuo. Esta associação entre morfologia, processos e dinâmica pode permitir atribuir prioridade nas medidas de controlo às formas potencialmente mais activas (op.cit: 602).

⁷⁸ Esta definição genérica é compatível com outras assumidamente parciais (e.g. ravina efémera), mas cujo valor prático é inegável.

Por fim, foi definido um conjunto de cinco questões para investigação à luz do enquadramento conceptual proposto. Para diferentes contextos ambientais, e ao longo do desenvolvimento de uma dada forma:

- (1) Como variam as contribuições dos diferentes processos (e.g. escoamento, movimentos de massa, tubulação) para a resposta erosiva?
- (2) Que factores controlam a morfologia, e em que medida a sua importância muda ao longo do tempo (e.g. quais os factores que definem a ocorrência de uma forma linear de “tipo fluvial” por oposição a uma forma alargada com múltiplas cabeceiras)?
- (3) Podem ser delimitadas fases de desenvolvimento de base quantitativa, por oposição às fases postuladas qualitativamente no passado (e.g. Ireland *et al.*, 1939; Wells *et al.*, 1991)?
- (4) Que factores controlam a transição entre uma forma individual e um sistema em rede ou complexo?
- (5) Que dinâmicas específicas apresentam os sistemas de ravinas e em que medida estas são controladas por diferentes factores (e.g. que factores determinam a estabilização de um complexo de ravinas, ou a sua expansão e coalescência com formas semelhantes até à formação de uma *badland*)?

7. O Ravinamento em Portugal

Embora frequentemente referido, tanto na literatura de âmbito geográfico mais geral como naquela centrada na geomorfologia ou na erosão do solo (e.g. Rebelo, 1981: 237; 2002: 21; Ferreira *et al.*, 1993: 38), o ravinamento tem sido, em Portugal, tema principal de escassos trabalhos.

Rebelo (1982) e Rebelo *et al.* (1986) descreveram o fenómeno em três locais distintos, no interior do perímetro urbano de Coimbra e nos arredores, observando a importância de diferentes factores naturais e antrópicos, e levantando a questão da definição de ravina e dos limiares associados a formas de diferentes dimensões.

Alguns anos mais tarde, a colaboração possibilitada pelo projecto MEDALUS (*Mediterranean Desertification and Land Use*), decorrendo entre 1991 e 1998 e abrangendo instituições de oito países da União Europeia (cf. Roxo e Casimiro, 1999), esteve por detrás de uma grande parte da bibliografia actualmente existente, centrada em áreas de trabalho nos concelhos de Mértola e Bragança. Estes trabalhos são de seguida revistos.

Vandaele *et al.* (1996) e Vandekerckhove *et al.* (1998, 2000a) determinaram limiares topográficos (vd. Cap. 4.1.3) para o surgimento de ravinas incipientes em ambas as áreas de

trabalho, comparando-os com aqueles obtidos em outros contextos ambientais. Posteriormente, Oostwoud Wijdenes *et al.* (1999) integraram os resultados de levantamentos de campo realizados por Vandekerckhove *et al.* (1998) com dados de uma área de estudo no Sudeste de Espanha, com vista ao estudo das relações entre a morfologia das cabeceiras de ravinas, o seu contexto ambiental, e o seu grau de desenvolvimento.

Vandaele *et al.* (1997) estimaram taxas de erosão em ravinas incipientes a partir de fotografias aéreas (1970-1985) para a área de Mértola. A comparação dos valores com dados publicados, obtidos em parcelas experimentais na estação experimental de Vale Formoso, permitiu concluir que o ravinamento (efémero) esteve, durante o período considerado, associado a taxas entre 4,5 e 5,2 vezes superiores às resultantes do escoamento laminar e em sulcos (op.cit.: 280). Poesen *et al.* (1996: 259) compararam o mesmo conjunto de dados com resultados obtidos em áreas experimentais na Bélgica e em Espanha, associando a grande importância relativa do ravinamento efémero nos dois países ibéricos ao elevado conteúdo em fragmentos de rocha no solo, impedindo a erosão pelo escoamento laminar, mas não a sua concentração e acção erosiva a jusante (onde a ausência de carga transportada contribui para a capacidade erosiva⁷⁹).

A área de Mértola foi também utilizada por Nachtergaele *et al.* (2001) para testar o modelo EGEM (*Ephemeral Gully Erosion Model*; Woodward, 1999), e por Nachtergaele *et al.* (2002b) para obter dados morfométricos de ravinas efémeras, depois combinados com outros no estudo da relação entre caudal e largura para canais de diferentes dimensões (*vd. 6*).

Fora do contexto do projecto MEDALUS, Pedrosa *et al.* (2001) estudaram o desenvolvimento de quatro ravinas amostrais na Serra do Marão, em diferentes contextos topográficos e litológicos. A monitorização das formas aproximadamente ao longo de nove meses permitiu observar que não existe uma relação directa entre precipitação e quantidade de material erodido, evidenciando o controlo exercido por processos que não o escoamento. Estes foram identificados pelos autores como movimentos de massa resultantes de ciclos de congelamento/fusão da água no solo e, em menor grau, a acção de escavamento realizada por insectos (op.cit.: 92).

Mais recentemente, Martins (2009) centrou-se na geomorfologia e na dinâmica quaternária da depressão Régua-Chaves-Verin, articulando-as com o ravinamento através da construção de um índice de risco e da respectiva cartografia.

⁷⁹ As relações entre destacamento e transporte foram já consideradas em 4.1.1.1.

Por fim, Roxo e Calvo-Cases (2009) abordaram o fenómeno no contexto do abandono do solo agrícola em Mértola. Com recurso a uma série temporal de imagens Landsat (1976-2005), descreveram um ciclo natural de incisão e estabilização de ravinas, com duração variável consoante a posição topográfica dos entalhes (fundo de vale/vertentes). Este ciclo inicia-se com a conversão de áreas agrícolas para pastagens, sendo a estabilização eventualmente atingida com a recuperação do coberto vegetal e, nas vertentes, com o desenvolvimento de crostas biológicas e o aumento relativo da granulometria do material.

8. Conclusões

A revisão bibliográfica realizada deixou claro que as diferentes definições de ravina e de ravinamento na literatura não abrangem a variedade de processos, factores e padrões evolutivos que lhes está associada, perpetuando uma representação inadequada do ravinamento como fenómeno essencialmente hídrico. Em ordem a promover a coerência teórica desde campo de estudos, e à semelhança de trabalhos anteriormente publicados, considerou-se crítico o reconhecimento definitivo da importância dos movimentos de massa.

Foi proposta uma definição genérica de ravina, bem como a concepção destas formas como conjugações, dinâmicas ao longo do tempo, entre morfologia, processos e as variáveis de controlo destes. O conceito de limiar geomórfico parece fornecer um enquadramento teórico ideal para o estudo destas interacções, permitindo (1) definir, para diferentes ambientes, pontos de transição nas interacções morfologia-processos-variáveis (e.g. o limiar a partir do qual os movimentos de massa passam a ter uma importância relativamente maior, a tubulação é activada/desactivada, ou a cabeceira se bifurca), e (2) delimitar fases entre esses pontos de transição, permitindo centrar futuros estudos em fases específicas, e integrar mais facilmente estudos realizados em ambientes diferentes, mas cujas formas atravessam fases marcadas por dinâmicas semelhantes. Esta abordagem dinâmica pode permitir ajustar medidas de prevenção e controlo aos processos relevantes em cada caso, por oposição à frequente ineficácia de medidas assentes no pressuposto de um controlo universal por parte do escoamento superficial.

Foram propostas cinco questões prioritárias para investigação, com dois propósitos fundamentais: (1) otimizar a definição de medidas de controlo e prevenção, ajustando-as aos processos associados a cada caso, e prevendo adequadamente as consequências de eventos susceptíveis de levar ao ultrapassar de limiares relevantes, tanto naturais (e.g. eventos de precipitação extrema, camadas subjacentes relativamente erodíveis) como antrópicos (e.g.

mudanças de uso do solo); e (2) estender o campo temático do ravinamento aos sistemas de ravinas (em rede e em complexo), frequentemente observados, mas raramente estudados. A sua evolução estabelece, com mais frequência do que as formas individuais, as transições entre o ravinamento, a geomorfologia fluvial e a geomorfologia de *badlands*.

II

Os padrões espaciais do ravinamento na margem esquerda da bacia do Baixo Tejo: uma perspectiva regional

II

Os padrões espaciais do ravinamento na margem esquerda da bacia do Baixo Tejo: uma perspectiva regional

Introdução

Procurou-se, neste Capítulo II do trabalho, construir uma perspectiva sobre o fenómeno do ravinamento na totalidade da área de estudo. Esta análise pretendeu, por um lado, diferenciar e caracterizar os grandes padrões que o fenómeno assume, e por outro aferir as ligações entre as formas que os compõem e um conjunto de factores, que o enquadramento teórico em que se centrou o Capítulo I permitiu seleccionar como possivelmente relevantes. Ao mesmo tempo, pretende-se que esta primeira perspectiva de conjunto possa constituir um ponto de partida para trabalhos futuros, não só ajudando a definir questões de investigação relevantes, mas também salientando áreas prioritárias para estudos de pormenor, seja em função da abundância e dinamismo das formas, e portanto das suas consequências presentes e futuras para o uso do solo, seja devido ao seu interesse geomorfológico.

Do ponto de vista conceptual, entendeu-se no presente trabalho por *padrão de ravinamento* a conjugação entre morfometria, posição relativa e dinamismo que caracteriza as formas observáveis numa dada unidade espacial. Dada a extensão da área de estudo (c. 2912 km²), optou-se pelo recurso à interpretação de ortofotografias aéreas, técnica que tem sido aplicada tanto ao estudo de formas relativamente incipientes como de outras de maiores dimensões (e.g Morgan *et al.*, 1997; Vandaele *et al.*, 1997; Vandekerckhove *et al.*, 2003; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009).

De acordo com o enquadramento realizado no Capítulo I, o fenómeno do surgimento e crescimento de ravinas pode ser conceptualizado como resultando da conjugação de dois grandes processos ao longo do tempo: a erosão hídrica concentrada, e os movimentos de massa. A análise partiu assim do pressuposto teórico de que, à escala regional, os padrões gerais de ocorrência destes dois processos serão correlativos da distribuição espacial dos seus vários factores de controlo. Conjugações particulares destes factores tenderão a ser correspondidas por padrões de ravinamento particulares.

Com base neste pressuposto, optou-se por dividir a área de estudo em unidades caracterizadas por conjugações específicas de factores e centrar a atenção nas mais extensas. Face às limitações logísticas que um trabalho desta escala inevitavelmente acarreta, pretendeu-se

assim favorecer com uma análise mais detalhada as condições mais representativas da área de estudo.

A metodologia utilizada estruturou-se em quatro fases:

- 1) Sobreposição de um conjunto de temas cartográficos, permitindo delimitar espacialmente conjugações particulares de classes, denominadas Unidades Espaciais Homogéneas (UEH). A intersecção de mapas com vista à definição de áreas relevantes em termos de processos erosivos tem sido utilizada por diferentes autores (Flugel *et al.*, 2003; Bacellar *et al.*, 2005);
- 2) Foto-interpretação de áreas-amostra definidas sobre as UEH, permitindo a delimitação e caracterização dos padrões de ravinamento observados, seguida da validação destes no campo.
- 3) Análise e agrupamento dos vários padrões caracterizados em Padrões Gerais de Ravinamento (PGR), com base em propriedades comuns;
- 4) Análise das relações entre formas individuais, extraídas dos vários PGR, e os factores inicialmente utilizados para dividir a área de estudo;

Apresenta-se seguidamente uma caracterização geral da área de estudo. Dado que as distribuições espaciais da litologia e do tipo de solo (enquanto factores de ravinamento; vd. 1.2 e 1.3) são consideradas em detalhe mais à frente, optou-se por centrar esta descrição na morfologia do relevo, nos contextos hidrográfico e hipsométrico e na ocupação do solo.

1. Caracterização da área de estudo

A área estudada situa-se integralmente na margem esquerda da parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Tejo, aqui designada como "bacia do Baixo Tejo". Esta designação não assenta em qualquer divisão oficial, administrativa ou hidrográfica, mas pretende apenas circunscrever em termos gerais a área no contexto do Território nacional. Ocupa uma extensão total de cerca de 2912 km², abrangendo total ou parcialmente os concelhos da Chamusca, Alpiarça, Almeirim, Salvaterra de Magos (integrados na NUTS III Lezíria do Tejo), Abrantes e Constância (NUTS III Médio Tejo), Gavião e Ponte de Sor (NUTS III Alto Alentejo). É limitada a N e a W pelo curso do Tejo, a S pelo do Sorraia e a E pelo do rio Sor. O seu limite NE corresponde ao limite do concelho de Gavião (Figura 8).

A selecção desta área de estudo em particular prendeu-se com quatro razões complementares: (1) apresenta formas erosivas abundantes, tal como foi possível observar numa prospecção

preliminar usando fotografias aéreas¹; (2) apresenta alguma variação em termos de morfologia do relevo e contexto litológico, potenciando a diversificação nos padrões erosivos existentes; (3) não tinha sido previamente alvo de qualquer trabalho centrado no fenómeno em estudo; e (4) situava-se suficientemente próxima de Lisboa para tornar logisticamente possível a componente de trabalho de campo necessária à execução do presente trabalho.

Morfologicamente, a área apresenta-se no seu sector mais a norte como uma extensa e aplanada região de interflúvio. Este interflúvio é entalhado de forma relativamente profunda pelos afluentes do Tejo ao longo do seu limite N e NW, de que são exemplos (de montante para jusante) a rib^a da Lampreia, o rio Torto, a rib^a de Alcolobra, a rib^a da Foz ou a rib^a de Ulme. A sua altitude aumenta de SW para NE, variando aproximadamente entre 140 m nas proximidades da desembocadura da rib^a de Ulme e 290 m de altitude nas proximidades da vila de Gavião.

No seu sector sul, e definindo como um limite geral Norte-Sul o curso da rib^a de Ulme, última linha de água de vale marcadamente entalhado, o relevo apresenta-se muito mais dissecado, marcado por uma sucessão de linhas de água de interflúvios suaves. Do ponto de vista da hidrografia, este sector é dominado pelas bacias das ribeiras de Muge e de Magos (drenando para o Tejo a W), e pelas bacias da ribeira da Erra e do rio Sor, drenando para o Sorraia a sul.

¹ Recorreu-se nesta fase preliminar à ferramenta *Google Earth*, de uso gratuito, possibilitando a prospecção de grandes extensões de território de forma muito mais rápida do que seria possível usando fotografias aéreas em ambiente SIG.

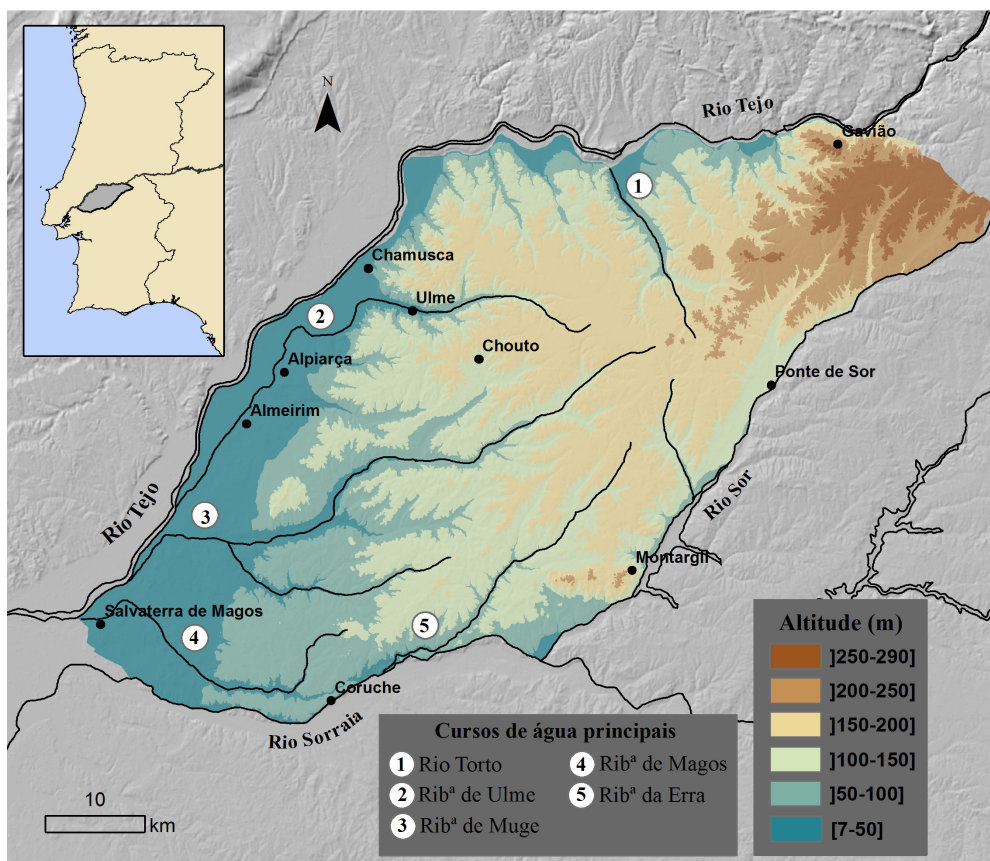


Figura 8 – A área de estudo: hipsometria, principais cursos de água e enquadramento face ao curso do Tejo (mapa menor acima, à esquerda; área de estudo é representada pelo polígono a cinzento). São mostradas as principais localidades abrangidas.

Ao longo da orla da área de estudo definida pelo curso do Tejo definem-se extensões relativamente aplanadas, constituídas no essencial por terraços fluviais, o mesmo ocorrendo ao longo do curso da ribª de Sor (limite SE da área de estudo). No limite W, uma parte importante destas extensões planas é de natureza aluvionar e constitui já parte da grande planície aluvial do Tejo, apenas marginalmente abrangida pela área de estudo. A altitude mínima observada, cerca de 7 m, é atingida no extremo SW deste sector, nas proximidades de Salvaterra de Magos.

A morfologia do relevo apresenta uma relação muito próxima com o contexto geológico (caracterizado com maior detalhe em II.2.1.2). Na sua grande maioria, é dominada por materiais sedimentares detríticos. Destes, os materiais conglomeráticos (Conglomerados da Serra de Almeirim na terminologia da Carta Geológica 1: 500000) constituem os mais recentes (Pliocénico) e dominam o sector norte, definindo o extenso interflúvio já referido, parte da superfície culminante da bacia terciária do Tejo. Esta superfície inclui, para além da superfície terminal de acumulação sedimentar, níveis de aplanamento mais recentes, nela embutidos (Martins, 2004: 49).

A sul, os conglomerados são substituídos por materiais areníticos e argilosos (os Arenitos de Ulme e as Argilas de Tomar), cuja relativa brandura é correlativa da maior dissecação que marca a topografia. Os materiais magmáticos e metamórficos têm apenas uma presença residual na área de estudo, ocorrendo ao longo da orla N e num sector muito restrito no limite SE. A distribuição espacial das diferentes litologias presentes é apresentada em II.2.2.

A ocupação do solo foi considerada com base na cartografia CORINE Land Cover de 2006² (Caetano *et al.*, 2009), sendo a importância relativa das diferentes classes face à área de estudo apresentada na Tabela 2. A sua análise torna evidente a preponderância dos usos florestais, associados às três classes mais importantes, e abrangendo mais de 62% de toda a área. O conjunto dos usos agrícolas, por vezes em associação com os florestais (classes 244 e 243³), representa pouco mais de 34%.

Em ordem a analisar e a caracterizar os padrões de distribuição espacial da ocupação do solo, optou-se por agrupar as tipologias de floresta (Florestas de Folhosas, Resinosas e Mistas) numa só classe, já que, face ao nível de generalização que a presente análise de escala regional implica, pode assumir-se um grau de cobertura e protecção semelhante para todas⁴. O mesmo não ocorre com a classe Espaços florestais Degradados, Cortes e Novas Plantações, que inclui áreas onde a densidade das copas é mais limitada, com consequências na hidrologia das vertentes e potencialmente na erosão (e.g. Reid *et al.*, 2010).

A importância relativa das diferentes classes face à área de estudo (Tabela 2) foi utilizada como critério para a reclassificação daquelas abrangendo menos de 1% da área total como não tendo expressão à escala considerada. Esta operação excluiu adicionalmente todas as classes onde, por natureza, não existem condições para a ocorrência de ravinamento (e.g. planos de água, aeroportos, praias, dunas e areais). A distribuição espacial das classes finais é apresentada na Figura 9.

² Disponibilizada pelo Instituto Geográfico Português em: http://dgterritorio.pt/e-IGEO/egeo_downloads.htm

³ Respetivamente Sistemas agro-florestais e Agricultura com espaços naturais.

⁴ De acordo com a classificação CORINE Land Cover, as três classes pressupõem um mínimo de 30% de cobertura do solo por parte das copas (Bossard *et al.*, 2000: 67-69).

Tabela 2 - Classes CORINE Land Cover (Fonte: Instituto Geográfico Português) na área de estudo e respectivas áreas absolutas e relativas.

Código CORINE	Designação	Área (ha)	Área relativa (%)
311	Florestas de folhosas	114979,54	39,48
324	Espaços florestais degradados, cortes e novas plantações	43436,08	14,91
313	Florestas mistas	24513,16	8,42
242	Sistemas culturais e parcelares complexos	18980,73	6,52
244	Sistemas agro-florestais	16799,00	5,77
212	Culturas anuais de regadio	15325,34	5,26
243	Agricultura com espaços naturais	12840,69	4,41
221	Vinhas	10710,55	3,68
211	Culturas anuais de sequeiro	9332,20	3,20
223	Olivais	6976,38	2,40
213	Arrozais	5488,75	1,88
112	Tecido urbano descontínuo	2710,62	0,93
312	Florestas de resinosas	2526,32	0,87
222	Pomares	1553,35	0,53
241	Culturas anuais associadas às culturas permanentes	1516,01	0,52
511	Linhas de água	1181,33	0,41
121	Indústria, Comércio e equipamentos gerais	649,02	0,22
321	Pastagens naturais	380,81	0,13
512	Planos de água	330,37	0,11
331	Praias, dunas e areais	285,00	0,10
322	Matos	230,09	0,08
131	Áreas de extracção mineira	175,36	0,06
411	Pauis	147,20	0,05
122	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados	76,62	0,03
231	Pastagens	46,79	0,02
124	Aeroportos	29,12	0,01
133	Áreas em construção	28,95	0,01
323	Vegetação esclerofítica	16,96	0,01

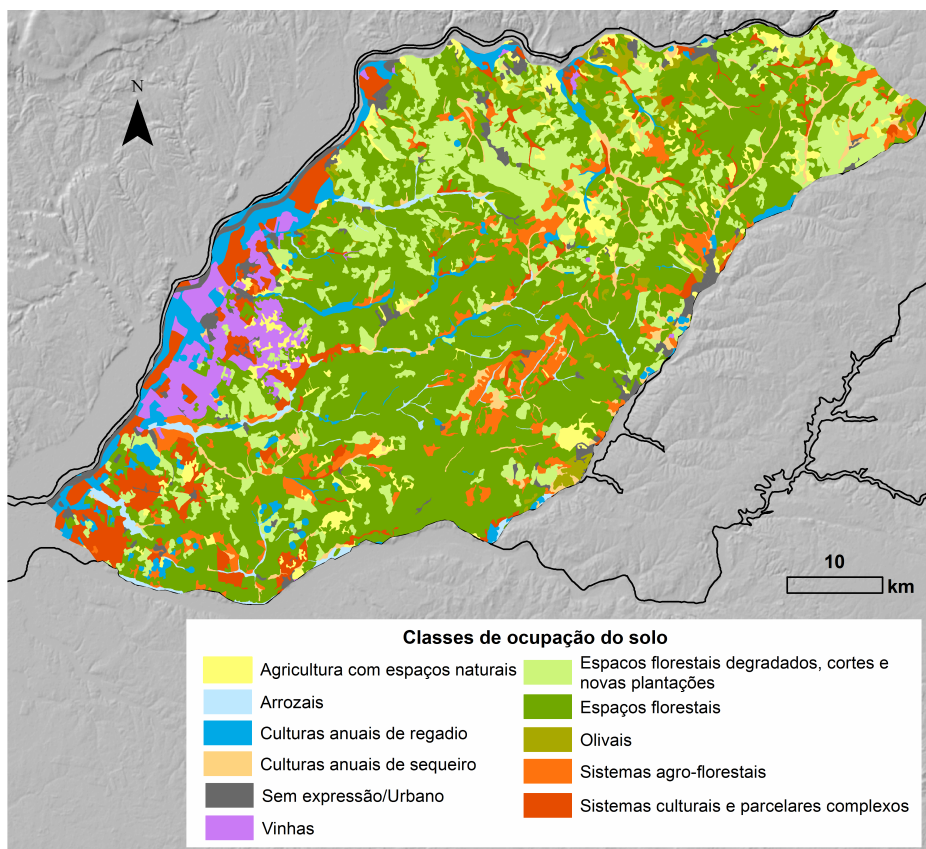


Figura 9 – Distribuição espacial da ocupação do solo na área de estudo, de acordo com a cartografia CORINE Land Cover 2006 (Fonte: Instituto Geográfico Português).

Constata-se uma concentração muito notória das culturas de regadio, vinha e dos sistemas culturais e parcelares complexos ao longo do troço do Tejo mais a jusante (orientação SW-NE), em correspondência com as áreas mais amplas de terraços e aluviões (vd. II.2.2, Figura 14) e com os aglomerados populacionais de maiores dimensões (Chamusca, Alpiarça, Almeirim, Salvaterra de Magos). Em contraste, todo o interior da área de estudo é dominado pelos usos florestais. Destes, há uma evidente concentração da classe Espaços Florestais Degradados, Cortes e Novas Explorações na porção mais a norte na área de estudo, correspondente ao amplo sector de interflúvio já referido.

Ainda no contexto do interior da área de estudo, são de referir os Sistemas agro-florestais, ocorrendo em manchas significativas nos sectores montante das ribeiras da Erra, de Muge e de Ulme, bem como em pequenas manchas ao longo do rio Sor, e a Agricultura com espaços naturais, ocorrendo num padrão de pequenas manchas dispersas no sector de interflúvio mais a norte e no sector sul da área de estudo (mas não no sector mais central).

Os fundos dos vales das principais linhas de água são ocupados sobretudo por arrozais, culturas de regadio e culturas de sequeiro (estas últimas sobretudo nas linhas de água tributárias do rio Sor no sector NE da área de estudo).

2. Delimitação de Unidades Espaciais Homogéneas

Começou-se por definir um conjunto de grandes factores como responsáveis pelos processos inerentes ao ravinamento. De acordo com o enquadramento teórico realizado no Capítulo I, seleccionaram-se cinco: topografia, litologia, tipo de solo, ocupação do solo, e o contexto climático.

Face à escala temporal alargada que pode caracterizar o ravinamento, considerou-se que a utilização da ocupação do solo não traria nesta fase da investigação qualquer vantagem. Com efeito, embora esta seja amplamente reconhecida como um factor crítico no surgimento e evolução de ravinas, está sujeita a mudanças potencialmente bruscas, pelo que a sua influência sobre o padrão erosivo observável num dado local tem forçosamente de ser considerada ao longo de todo o período durante e após o surgimento das formas. Dada a impossibilidade de considerar as transições passadas na ocupação do solo para toda a área de estudo, optou-se por eliminar este factor da análise. A ocupação, presente e/ou passada, foi assim considerada implicitamente como potencialmente responsável por associações entre conjugações similares dos factores utilizados e padrões erosivos distintos.

No que diz respeito ao contexto climático, a análise da distribuição espacial da precipitação anual média (Brito, 2005: 51) mostrou que as variações através da área de estudo são reduzidas, com toda a área apresentando valores entre 600 e 800 mm. A ausência de barreiras topográficas capazes de originar contrastes sugere que este factor não será relevante na diferenciação de padrões de ravinamento. Optou-se, assim, por eliminá-lo também da análise⁵. Para representar os três factores finais, foram utilizados quatro temas cartográficos: dois índices topográficos (Índice Topográfico de Encharcamento e Índice de Potência do Escoamento), a litologia e o tipo de solo. Após a classificação dos valores dos dois índices topográficos, os quatro temas foram analisados visualmente, sendo a área de estudo dividida quanto aos grandes padrões de distribuição espacial das várias classes. Esta divisão em grandes manchas teve como efeito generalizar a informação de escala maior, homogeneizando

⁵ Juntamente com a precipitação anual, analisou-se a distribuição da temperatura, com resultados similares. Toda a área apresenta uma temperatura média do ar anual entre 14° e 16°, sem elementos topográficos capazes de originar contrastes. Assumiu-se, assim, que a possível influência sobre o coberto vegetal, natural ou resultante de usos humanos, será irrelevante na distribuição dos padrões de ravinamento.

as escalas bastante discrepantes da informação original (1:25000 e 1:500000)⁶. Por fim, os temas foram sobrepostos.

O processo de análise de cada tema é descrito de seguida.

2.1. Índices topográficos

Os dois índices utilizados assentam nos mesmos dois parâmetros: declive e área de drenagem específica (i.e. área de drenagem total por unidade de comprimento das curvas de nível).

O Índice Topográfico de Encharcamento⁷ (ITE) ou Índice Topográfico de Humidade (ITH) é um indicador da tendência de uma dada área para acumular água, sendo formalizado como:

$$ITE = \ln \frac{A}{\tan(\beta)}$$

em que A é a área de drenagem específica, e β é o declive em graus. O índice assenta na noção de um balanço, em que a área de drenagem total é um indicador da tendência para acumular água, e o declive local e o comprimento das curvas de nível (implícito na área de drenagem específica) descrevem a tendência para a evacuar (Gruber e Peckham, 2009: 187).

O ITE foi utilizado como um indicador da tendência para o surgimento e expansão de ravinas, com base em vários mecanismos descritos na literatura. Em primeiro lugar, o aumento do teor em água no solo origina uma diminuição da sua coesão e, portanto, da sua resistência tangencial (vd. I.4.1.2.2). Ao mesmo tempo, a massa da água no solo aumenta a tensão tangencial a que este é sujeito, contribuindo para a formação de fracturas na base e a montante dos limites superiores das paredes/cabeceiras. A abundância de escoamento sub-superficial contribui para preencher fracturas pré-existentes e pode aumentar a pressão intersticial, promovendo a instabilidade. Adicionalmente, materiais dispersivos podem ser sujeitos à formação e colapso de tubos. Todos estes mecanismos, associados à expansão lateral e à regressão das cabeceiras através de movimentos de massa, foram já descritos (vd. I.4.2).

Paralelamente aos processos gravitacionais, a perda de coesão associada ao aumento da humidade promove a erodibilidade do solo face ao escoamento superficial, contribuindo para o surgimento de novos canais (Knapen *et al.*, 2007: 94). Bryan e Rockwell (1998) e depois Rockwell (2002: 506), concluíram mesmo, com base em flumes laboratoriais, que o processo de formação e ascensão de uma toalha freática em profundidade pode levar à perda de coesão

⁶ No caso particular dos solos, o tema foi adicionalmente reclassificado ao nível hierárquico mais geral. Este processo é descrito mais à frente.

⁷ *Topographic Wetness Index* no original.

superficial e a aumentos acentuados nas taxas de erosão antes mesmo da condição saturada atingir a superfície, atribuindo o fenómeno ao aumento da pressão intersticial no solo.

No contexto específico do ravinamento, Bou Kheir *et al.* (2007: 1777) utilizaram com sucesso o ITE, juntamente com um índice referente à capacidade de transporte do escoamento, para prever 80% da variância na dimensão das ravinas numa área do Líbano.

O Índice de Potência do Escoamento⁸ (IPE) pode ser usado para descrever a erosividade do fluxo, assentando na relação directa entre área de drenagem e declive, por um lado, e quantidade e velocidade do escoamento, por outro. É formalizado como:

$$IPE = A \cdot \tan(\beta)$$

Nachtergaele *et al.* (2002a: 233) propuseram que a tendência exponencial negativa observada no desenvolvimento de ravinas ao longo do tempo é melhor explicada pela diminuição do produto entre área de drenagem e declive na cabeceira do que pela simples diminuição da área de drenagem, conforme tinha anteriormente sido sugerido por outros autores (e.g. Graf, 1977). No presente trabalho, o IPE foi utilizado como um indicador da erosividade potencial do escoamento, e portanto da propensão para a ocorrência de erosão hídrica concentrada. Numa utilização semelhante, Daba *et al.* (2003) observaram, com relação a uma área de estudo na Etiópia, que a integração do ITE e do IPE se ajustou bastante à distribuição das ravinas existentes, cartografadas a partir de ortofotos.

A obtenção dos dois temas teve por base um modelo numérico de elevação (MNE) de estrutura TIN (*Triangulated Irregular Network*) da área de estudo, construído a partir da topografia de escala 1:25000 da Carta Militar de Portugal. O algoritmo de construção utiliza os pontos de altitude conhecida que constituem as curvas de nível para definir uma rede de triângulos irregulares, de acordo com três critérios: (1) um círculo que passe pelos três vértices de qualquer triângulo (circumcírculo) não contém outros pontos no seu interior; (2) não há triângulos sobrepostos; (3) não há porções sem informação no interior da rede (Eastman, 2006: 272). Estes critérios, que definem a chamada triangulação de Delaunay⁹, originam uma superfície na qual os ângulos mínimos dos triângulos constituintes são maximizados, tendo o método as vantagens de incluir todos os pontos de valores (x,y,z) conhecidos e de possuir um detalhe proporcional à densidade de pontos de entrada.

O modelo resultante foi depois convertido para estrutura matricial com uma resolução de 10 m, processo que implicou a interpolação linear dos valores em cada célula com base na distância aos vértices do triângulo a que se sobrepõe. Este modelo, depois de corrigido de

⁸ *Stream Power Index* no original.

⁹ Nomeada em homenagem ao matemático russo Boris Delaunay, a quem o método é atribuído.

forma a eliminar depressões geradoras de erros em modelação hidrológica (i.e. *sinks*)¹⁰ permitiu a extracção dos declives e da área de drenagem específica.

Com respeito à área de drenagem específica, foi primeiro definida a direcção do escoamento, constituindo este tema o *input* posterior para a definição do escoamento acumulado (i.e. o número de células que drenam para um dado ponto no espaço)¹¹. Como unidade de comprimento das curvas de nível foi adoptada a largura da célula, de acordo com Daba *et al.* (2003: 283). Os valores referentes aos dois índices foram por fim classificados, e a análise visual dos mapas resultantes permitiu diferenciar padrões de ocorrência, conforme descrito de seguida.

Importa salientar que a delimitação das UEH não teve por objectivo caracterizar a susceptibilidade do território ao ravinamento, mas apenas diferenciar os padrões de ocorrência de um conjunto de variáveis consideradas relevantes para o fenómeno. Neste contexto, não se pretendeu classificar os dois índices em função de quaisquer limiares críticos previamente descritos na literatura.

2.1.1. Índice Topográfico de Encharcamento

O ITE varia na área de estudo entre 1 e 31, com uma média de 6,77 e um desvio-padrão de 2,57. Com vista à sua classificação, a distribuição foi analisada num gráfico de frequências acumuladas (Figura 10). Na ausência de quebras, estabeleceram-se quatro classes: [1-4],]4-6],]6-8] e]8-31], procurando dividir a distribuição de forma equivalente. O mapa resultante e os padrões espaciais delimitados na área de estudo são apresentados na Figura 11.

A análise do mapa permitiu diferenciar três padrões de ocorrência. As áreas de *ITE reduzido* situam-se essencialmente no sector N da área de estudo, sendo caracterizadas por uma elevada densidade de valores na classe mais baixa. Fora do sector N definiu-se apenas uma mancha deste padrão, nas imediações de Montargil (limite SE). As áreas de *ITE médio* ocupam a maioria da área de estudo, sendo caracterizadas por um padrão disperso de valores nas classes mais elevadas. Por fim, as áreas de *ITE elevado*, como a designação indica, são caracterizadas pela concentração dos valores de classe mais elevada. Estes valores, para além das concentrações ao longo dos muitos cursos de água que drenam a região, concentram-se nos sectores terminais dos vários tributários do Tejo no limite N da área de estudo, da ribeira de Ulme no limite NW, e do Rio Sor a E. Os valores médios e de desvio-padrão associados a cada padrão espacial são apresentados na Tabela 3, bem como as respectivas áreas ocupadas.

¹⁰ Foi utilizada a ferramenta *Fill*, do *software* ArcGIS 9.1.

¹¹ Foram usadas sucessivamente as ferramentas *Flow Direction* e *Flow Accumulation*.

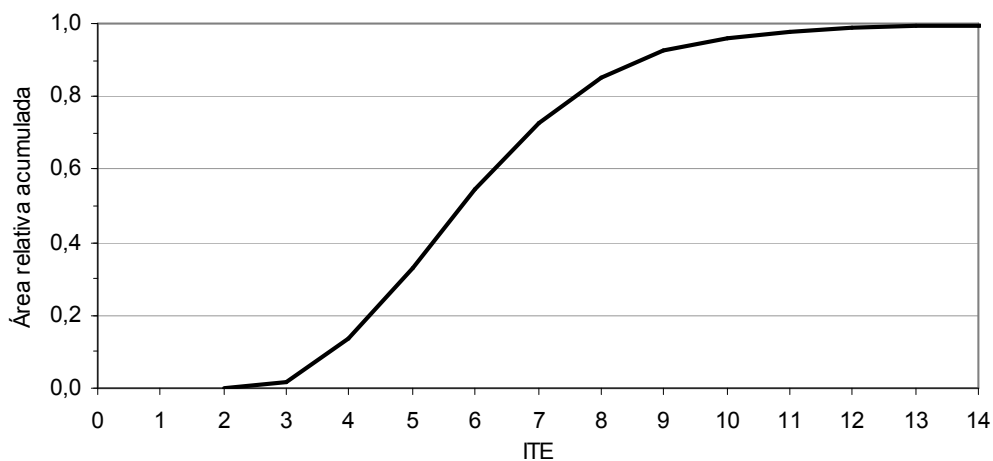


Figura 10 - Relação entre Índice Topográfico de Encharcamento (ITE, adimensional) e área relativa acumulada. Os valores de ITE entre 14 e o máximo observado de 31 representam apenas 0,007 da área de estudo, e não foram representados.

Tabela 3 – Características dos padrões espaciais definidos de Índice Topográfico de Encharcamento.

Padrão	Média	Desvio-padrão	Área	
			Absoluta (ha)	Relativa (%)
I - ITE Reduzido	5,7	2,3	74324,2	25,5
II - ITE Médio	6,3	2,3	126444,0	43,4
III - ITE Elevado	8,5	2,4	90519,6	31,1

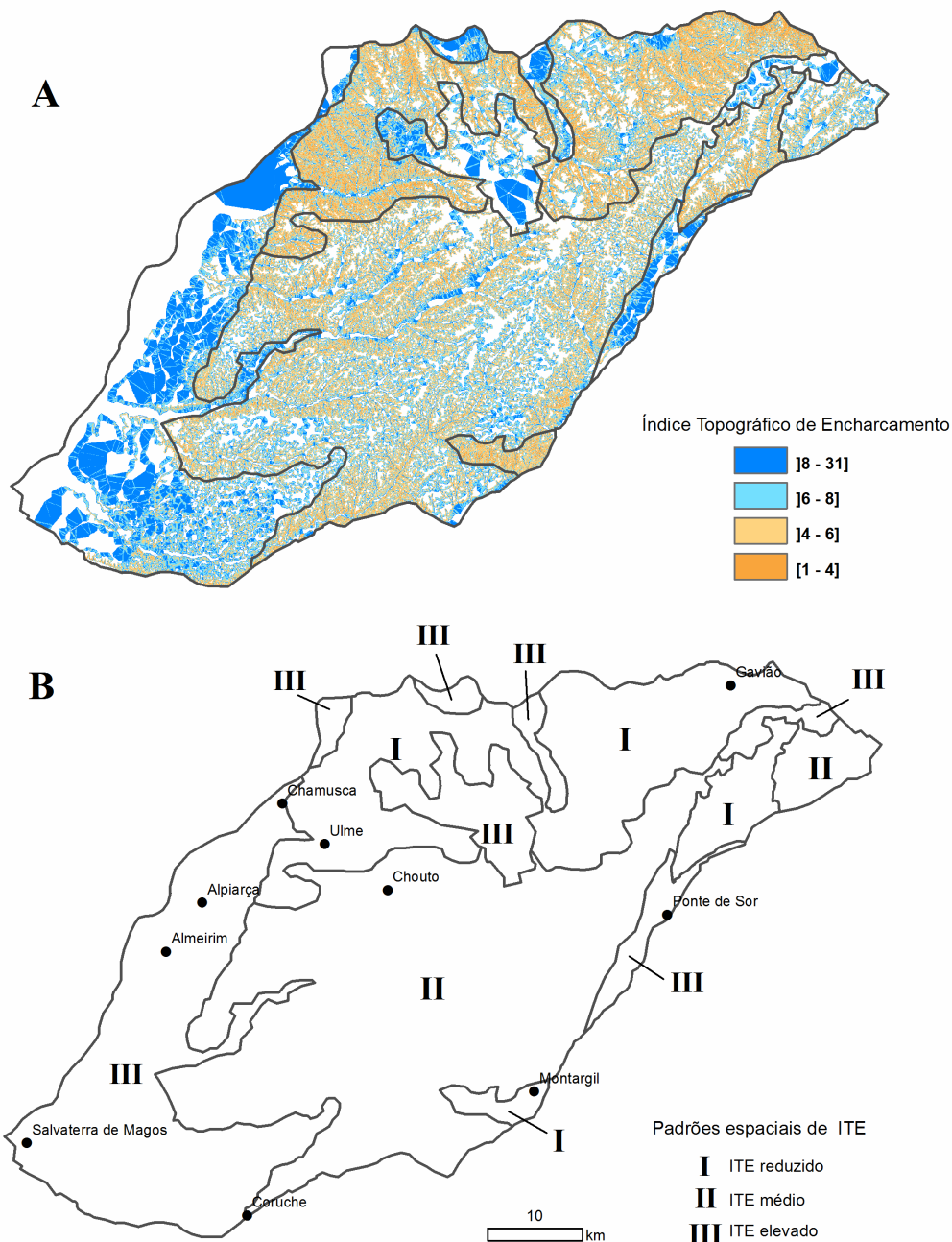


Figura 11 – Índice Topográfico de Encharcamento (ITE) na área de estudo: distribuição das classes e delimitação de padrões (A) e identificação dos padrões delimitados (B).

2.1.2. Índice de Potência do Escoamento

O IPE apresenta na área de estudo uma elevada variação, com valores entre 0 e 2141156, um valor médio de 197,3 e um desvio-padrão de 9205,2. Aproximadamente 90% de toda a área possui valores menores ou iguais a 15, tendo 54,4% valor 0 (Figura 13).

Dada a inexistência de quebras, procurou-se estabelecer limites de classe de forma a dividir de forma equivalente a parte mais significativa da distribuição (i.e. os valores de IPE de 1 até ao

ponto da distribuição a partir do qual a percentagem acumulada de células sofre aumentos muito reduzidos com o aumento do valor do Índice). Associou-se este limite superior a um valor de 9, tendo sido delimitadas quatro classes: [0],]0-3],]3-9], e]9-2141156].

A análise do mapa resultante permitiu identificar quatro padrões distintos de ocorrência.

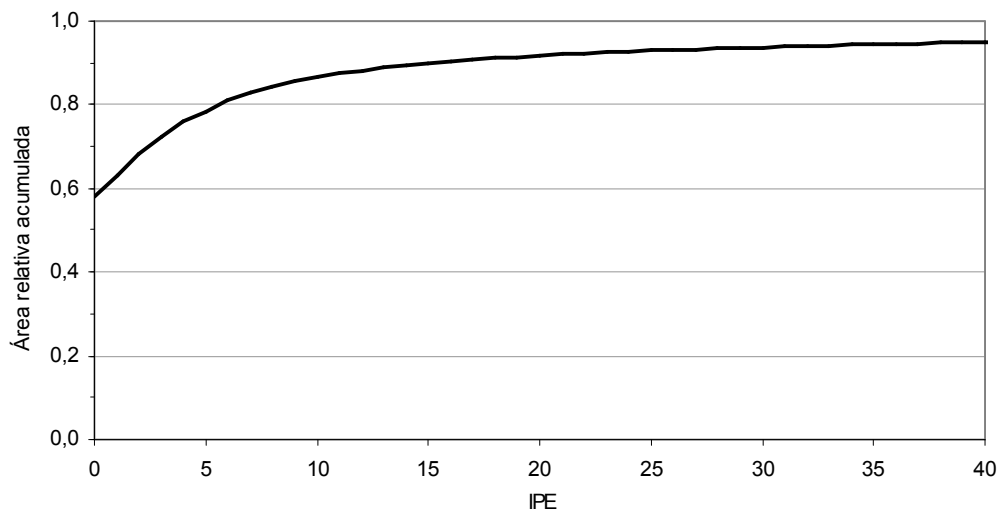


Figura 12 - Relação entre Índice de Potência do Escoamento (IPE) e área relativa acumulada. Os valores de IPE entre 40 e o valor máximo de 2141156 caracterizam apenas 0,05 da área total, e não foram representados.

O padrão I, *Valores muito reduzidos* é caracterizado pelo predomínio claro dos valores nulos. Caracteriza os sectores da planície aluvial do Tejo, numa orientação SSW-NNE entre Salvaterra de Magos e a Chamusca. O padrão de *Valores reduzidos* (II) é marcado por uma presença importante de células na classe entre 0 e 3, com uma representação dispersa das duas classes superiores. Ocorre em três locais: uma faixa de topografia suave entre Salvaterra de Magos e Alpiarça, correspondente em grande parte a extensos níveis de terraços, uma área aplanada de configuração irregular a NE da localidade de Chouto, e uma terceira área aplanada de orientação aproximadamente SW-NE, no extremo NE da área de estudo.

Os dois padrões restantes caracterizam-se pela abundância de células nas classes mais elevadas, sendo o seu critério de diferenciação a densidade com que se apresentam. Os *Valores elevados com baixa densidade* (III) abrangem a generalidade do sector S e SE da área de estudo, incluindo a localidade de Ponte de Sor. Os *Valores elevados com elevada densidade* (classe IV) dominam a maioria do sector N da área de estudo, abrangendo as localidades de Ulme e Gavião. Definiu-se também uma pequena área associada a este padrão em torno de Montargil, ao longo do limite SE da área de estudo. As médias e os desvios-

padrão dos valores nos vários padrões espaciais, bem como as respectivas áreas ocupadas, são apresentados na Tabela 4.

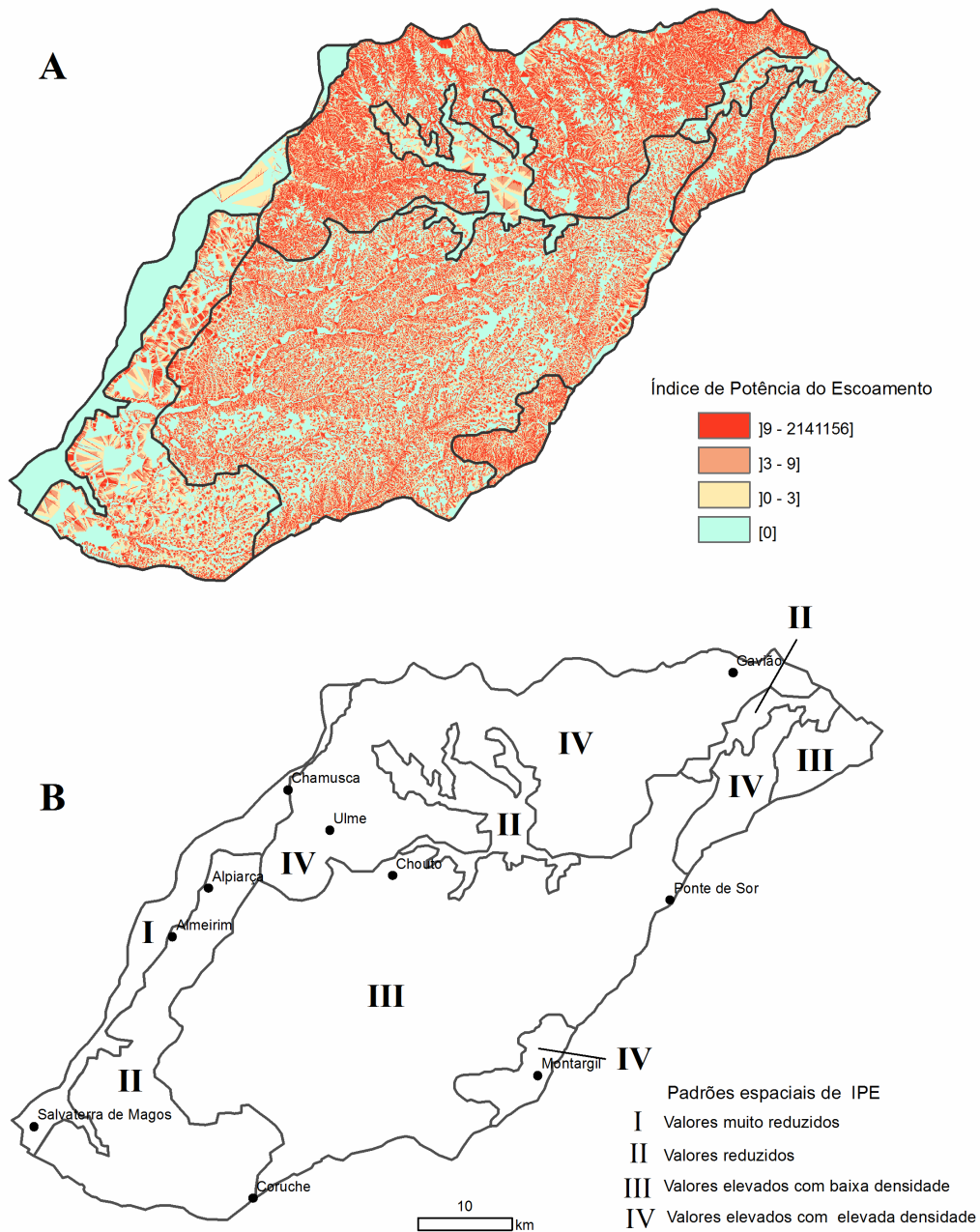


Figura 13 – Índice de Potência do Escoamento na área de estudo: distribuição das classes e delimitação de padrões (A), e identificação dos padrões delimitados (B).

Tabela 4 – Características dos padrões espaciais definidos de Índice de Potência do Escoamento.

Padrão	Média	Desvio-padrão	Área	
			Absoluta (ha)	Relativa (%)
I - Valores Muito Baixos	11,9	982,8	16139,3	5,5
II - Valores baixos	80,6	6539,4	55749,2	19,1
III - V. elevados, baixa densidade	225,6	10523,1	130642,0	44,9
IV - V. elevados, elevada densidade	262,7	9383,2	88749,9	30,5

Importa salientar que o processo de delimitação de padrões espaciais, tanto dos dois Índices como dos outros dois temas à frente descritos, envolveu inevitavelmente uma componente de arbitrariedade. A análise visual das Figuras 11 e 13 torna evidentes, ao longo da área de estudo, concentrações locais de valores mais elevados ou reduzidos do que os que caracterizam a área envolvente. Exemplos são os valores relativamente elevados de ITE ao longo dos trajectos de cursos de água de sentido NE-SW, na parte central da área de estudo¹² (Figura 11). Estas concentrações não foram alvo de delimitação pela sua reduzida dimensão e/ou porque não foram consideradas suficientemente distintas do padrão envolvente. Apesar da arbitrariedade, considerou-se a metodologia de delimitação justificada pelo seu objectivo orientador. As unidades espaciais que se procurou diferenciar correspondem aos padrões *gerais* dos temas utilizados: o seu propósito é o de servir de orientação para observações posteriores de escala maior, e não o estabelecimento de limites rígidos entre sectores.

2.2. Litologia

A natureza das rochas tem um papel fundamental no ravinamento. Ao contrário do que ocorre na erosão laminar e em sulcos, as ravinas ultrapassam frequentemente toda a espessura do *solum*¹³, tornando-se assim a sua evolução uma função sobretudo das propriedades hidrológicas e mecânicas das formações rochosas presentes, particularmente em locais onde as condições não são favoráveis ao desenvolvimento de solos profundos. Na revisão bibliográfica realizada (Capítulo I) foram já referidas situações em que o comportamento mecânico e hidrológico do rególito configura um limiar geomórfico, passando a controlar a evolução de ravinas a partir do ponto em que este é atingido. Como exemplos, Morgan e Mngomezulu (2003: 405) associaram este limiar à reduzida força tangencial de um saprólito subjacente a um solo relativamente resistente, e Bacellar *et al.* (2005: 1382) salientaram o contexto hidrológico, associando o desenvolvimento de grandes ravinas à propensão para os movimentos de massa de um material arenoso sujeito a pressões intersticiais positivas (i.e. condições artesianas), a partir da altura em que um estrato confinante de argila é ultrapassado. Nas situações em que os processos erosivos agem directamente sobre um solo propriamente dito, o comportamento hidrológico do rególito subjacente influencia ainda assim o seu teor em água e portanto a geração de escoamento (superficial ou não), exercendo um controlo

¹² Ribeiras de Chouto e de Muge.

¹³ No presente trabalho, o termo *solo* é utilizado em sentido restrito, reportando-se ao *solum*, i.e. a camada superior do rególito, onde os processos biológicos são mais sensíveis. Esta camada corresponde, em termos pedológicos, aos horizontes A e B (Brady e Weil, 2008: 13). Por oposição, *rególito* é aqui utilizado para designar todo o material ocorrendo desde a superfície até à rocha-mãe não meteorizada.

sobre a erosividade do fluxo, e a erodibilidade e comportamento mecânico do próprio solo superficial. O processo de tubulação ou *piping*, já considerado na revisão bibliográfica (vd. I.4.2.1), pode ter expressão apenas no rególito, originando canais e o seu colapso posterior sob solos relativamente pouco erodíveis.

Importa referir que, mesmo em litologias consolidadas, a rede de fracturação oferece locais propensos a uma alteração relativamente profunda, concentrando o escoamento sub-superficial, acelerando a eluviação de partículas do solo e levando a um abaixamento da superfície topográfica. A concentração do escoamento nestas depressões favorece, superficialmente, a formação de entalhes (Valentin *et al.*, 2005: 139) e, sub-superficialmente, o desenvolvimento de tubos (Martín-Penela, 1994: 220).

Numa escala temporal mais alargada, a litologia influencia o comportamento do solo através do seu próprio material originário, um dos factores essenciais da pedogénese.

A classificação litológica adoptada e a delimitação dos sectores tiveram como base a Carta Geológica de Portugal à escala 1:500000 (Oliveira *et al.*, 1992). As áreas absolutas e relativas das diferentes classes são apresentadas na Tabela 5.

Os valores evidenciam o predomínio das formações sedimentares terciárias e quaternárias. A distribuição espacial das diferentes classes de litologia é apresentada na Figura 14, tendo os materiais magmáticos e metamórficos (cerca de 3,6% da área de estudo) sido agregados de forma a facilitar a leitura.

Numa abordagem inicial à classificação, definiram-se dois grandes padrões. Ao longo do Tejo, na orla N e W da área de estudo, e em menor grau ao longo da rib^a de Sor e do rio Sorraia, a E e a S, distribuem-se faixas de aluviões e terraços quaternários (I). A restante área de estudo é marcada por um padrão geral de alternância entre materiais terciários, cujo afloramento é controlado pelo entalhe da rede hidrográfica. Destas litologias, têm maior relevância as Argilas de Tomar (Miocénico), os Arenitos de Ulme e os Conglomerados da Serra de Almeirim (Pliocénico).

No interior desta extensa área, diferenciaram-se três padrões espaciais distintos: um sector de maiores dimensões, correspondente à alternância de materiais já referida, caracterizado ainda pela presença de aluviões ao longo dos cursos de água mais importantes (e.g. rib^a de Ulme, rib^a de Muge) (II); um sector junto ao limite N da área de estudo, marcado pela presença dos Conglomerados da Serra de Almeirim numa superfície contínua relativamente extensa, com uma presença menor dos Arenitos de Ulme (III); e um sector de dimensões relativamente pequenas no SE da área de estudo, caracterizado por um predomínio muito claro dos Arenitos de Ulme (IV).

Os materiais magmáticos e metamórficos paleozóicos ocorrem em pequenas manchas nas orlas S e NE (V).

As áreas associadas aos diferentes padrões e a cada uma das unidades litológicas que neles ocorrem são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 – As diferentes unidades litológicas na área de estudo e as suas áreas absolutas e relativas.

Designação	Área (ha)	% da área total
Arenitos de Ulme	112245,0	38,5
Conglomerados da Serra de Almeirim	68186,3	23,4
Terraços, Areias e Cascalheiras	32069,1	11,0
Aluviões	27024,4	9,3
Argilas de Tomar	20613,3	7,1
Terraços arenosos	19315,8	6,6
Turbiditos	3317,3	1,1
Granitos biotíticos porfiróides	1606,9	0,55
Ortognaisses migmatíticos	1603,1	0,55
Xistos, grauvaques, chertes negros e vulcanitos ácidos	1037,2	0,36
Xistos e grauvaques	975,6	0,34
Formação de Vale do Guiso (areias, grés, argilas)	815,4	0,28
Granito de duas micas	531,3	0,18
Gabros e outras rochas básicas	518,3	0,18
Areias e lenhitos	354,0	0,12
Pórfiros riolíticos, pórfiros graníticos e aplito-pegmatitos	345,7	0,12
Dioritos e gabros	295,8	0,10
Calcários dolomíticos/mármoreos	131,3	0,045
Vulcanitos básicos	122,0	0,042
Granitos biotíticos	106,7	0,037
Ortognaisses e granitos	23,5	0,008

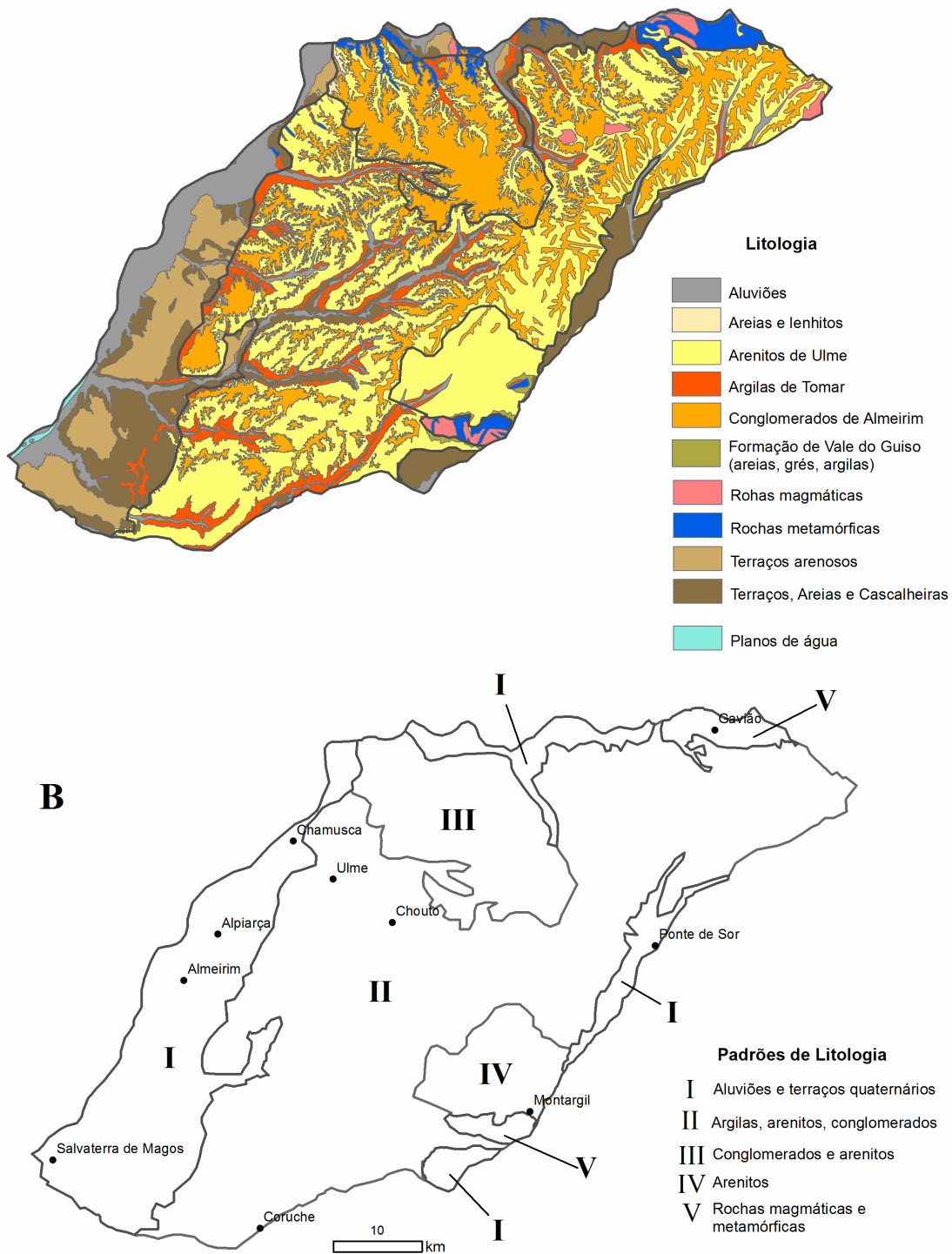


Figura 14 – Distribuição da litologia na área de estudo: (A) unidades litológicas e delimitação de padrões; (B) Identificação dos padrões delimitados.

Tabela 6 – Áreas absolutas e relativas dos padrões litológicos delimitados (face à totalidade da área de estudo), e das suas litologias constituintes (face a cada padrão). Foram representadas apenas as classes que ocupam mais de 1% da área dos respectivos padrões.

Padrão	Unidades Litológicas	Área	
		Absoluta (ha)	Relativa (%)
I - Aluviões e terraços quaternários		69023,2	23,7
	Aluviões	18685,7	27,1
	Arenitos de Ulme	801,2	1,2
	Argilas de Tomar	1906,9	2,8
	Materiais Metamórficos	1023,3	1,5
	Terraços Arenosos	18801,0	27,2
	Terraços, Areias e Cascalheiras	26859,7	38,9
II - Argilas, arenitos, conglomerados		168281,4	57,8
	Aluviões	7623,9	4,5
	Arenitos de Ulme	89251,5	53,0
	Argilas de Tomar	16953,1	10,1
	Conglomerados da Serra de Almeirim	47526,7	28,2
	Terraços, Areias e Cascalheiras	4959,4	2,9
III - Conglomerados e arenitos		32501,2	11,2
	Areias e Lenhitos	313,3	1,0
	Arenitos de Ulme	8663,6	26,7
	Argilas de Tomar	1203,5	3,7
	Conglomerados da Serra de Almeirim	20236,6	62,3
	Materiais Metamórficos	1532,4	4,7
IV - Arenitos		14440,0	5,0
	Aluviões	289,2	2,00
	Arenitos de Ulme	12848,7	88,98
	Argilas de Tomar	289,5	2,00
	Conglomerados da Serra de Almeirim	226,0	1,57
	Formação de Vale do Guiso	519,2	3,60
	Materiais Metamórficos	144,1	1,00
V - Rochas magmáticas e metamórficas		7041,5	2,4
	Aluviões	229,4	3,26
	Arenitos de Ulme	397,6	5,65
	Materiais Magmáticos	1985,8	28,20
	Materiais Metamórficos	4404,8	62,55

2.3. Solos

As propriedades do solo que influenciam os processos do ravinamento foram já consideradas na revisão bibliográfica (Capítulo I). Na presente divisão da área de estudo, porém, a escala regional impossibilita a utilização de variáveis tão específicas como a resistência tangencial ou a textura. Diferenciaram-se assim padrões espaciais em função do tipo de solo, extraído da

Carta Complementar de Solos de Portugal, de escala 1:25000¹⁴, e de acordo com a classificação desenvolvida pelo SROA (Carvalho Cardoso, 1974).

Dada a escala relativamente grande da informação, as conjugações de Famílias de solos associadas a cada polígono foram generalizadas para a Família dominante, e esta para a Ordem respectiva. A Tabela 7 apresenta a extensão absoluta e relativa de cada Ordem e respectivas Sub-ordens na área de estudo.

Embora a Ordem seja o nível mais geral do sistema de classificação, tem a vantagem de dividir todos os solos presentes num máximo de dez classes, facilitando a análise regional pretendida. Ao mesmo tempo, os critérios que definem cada Ordem de solos têm implicações no seu comportamento erosivo, justificando o uso das Ordens para diferenciar grandes padrões, embora forçosamente muito generalizados. Como exemplos, será de esperar que os Barros incluam solos de elevada coesão, e que o aprofundamento de entalhes seja condicionado pelo horizonte árgico dos Solos Argiluvitados Pouco Insaturados (e.g. Poesen *et al.*, 2003: 101; Vanwalleghem *et al.*, 2005a: 83).

A análise da Tabela 7 e da Figura 15 torna evidente que as áreas ocupadas variam muitíssimo entre diferentes classes de solos. A Ordem dos Solos Podzolizados predomina, ocupando a Subordem dos Podzóis Não Hidromórficos mais de 41% de toda a área de estudo. A Subordem dos Solos Litólicos Não Húmicos é a segunda mais extensa, abrangendo mais de 22% da área total.

As Ordens dos Solos Incipientes (dominada por Aluviossolos, cujos 9,4 % se distribuem ao longo de toda a orla W da área estudada) e dos Solos Argiluvitados Pouco Insaturados são, respectivamente, a terceira e quarta mais representadas, com manchas contínuas bastante significativas. A Ordem dos Solos Hidromórficos, na qual predominam os Solos Hidromórficos Sem Horizonte Eluvial, tem uma expressão reduzida (6 %) restringindo-se à rede de drenagem.

As restantes Ordens presentes (Solos Calcários, Barros, Solos Hidromórficos e Solos Orgânicos Hidromórficos) têm uma presença residual, não chegando a representar 1% da área em estudo. Os Barros concentram-se numa pequena área localizada a sul de Montargil (SE da área de estudo). Os Solos Calcários apresentam pequenas áreas em torno desta mesma

¹⁴ A carta, distribuída pela Direcção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (DGADR), resulta de trabalhos realizados primeiramente pelo SROA (Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário), e posteriormente pelas entidades que lhe sucederam: CNROA (Centro Nacional de Reconhecimento e Ordenamento Agrário), Divisão de Solos do IDRHa (Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica), e a Divisão da Gestão do Regadio e da Qualidade da Água da DGADR.

localidade e no extremo norte da área de estudo, e os Solos Orgânicos Hidromórficos ocupam uma única mancha no extremo S.

Tabela 7 - Áreas absolutas e relativas das ordens e subordens de solos na área de estudo.

Ordem	Subordem	Área (ha)	% da área de estudo ¹
1 - Solos Incipientes		45315,4	15,9
	11 - Litossolos	2974,8	1,04
	12 - Regossolos	10862,5	3,81
	13 - Aluviossolos	26778,6	9,38
	14 - Solos de baixas	4699,6	1,65
2 - Solos Litólicos		66230,9	23,2
	21 - Solos Litólicos Húmicos	2931,9	1,03
	22 - Solos Litólicos Não-Húmicos	63299,0	22,18
3 - Solos Calcários		93,6	0,03
	31 - Solos Calcários Pardos	62,9	0,02
	32 - Solos Calcários Vermelhos	30,7	0,01
4 - Barros		632,7	0,22
	41 - Barros Pretos	25,2	0,01
	43 - Barros Castanho-avermelhados	607,5	0,21
6 - Solos Argiluvitados Pouco Insaturados		37319,4	13,1
	61 - Solos Mediterrâneos Pardos	16511,9	5,79
	62 - Solos Mediterrâneos Vermelhos ou Amarelos	20807,6	7,29
7 - Solos Podzolizados		118777,1	41,6
	71 - Podzóis (Não Hidromórficos)	118529,7	41,53
	72 - Podzóis Hidromórficos	247,4	0,09
9 - Solos Hidromórficos		17019,5	6,0
	91 - Solos Hidromórficos Sem Horizonte Eluvial	16903,5	5,92
	92 - Solos Hidromórficos Com Horizonte Eluvial	116,0	0,04
10 - Solos Orgânicos Hidromórficos		5,4	0,002
	101- Solos Turfosos Com Materiais Sápricos	5,4	0,002

¹A área total considerada é aquela ocupada por qualquer tipo de solo. Excluíram-se as áreas de afloramentos rochosos, depósitos de pedras, áreas artificializadas e extensões de água.

A distribuição das diferentes Ordens de solos permitiu individualizar cinco padrões espaciais. O primeiro (I) é marcado pelo predomínio dos Solos Incipientes, ocupando toda a orla W da área de estudo (Aluviossolos e Regossolos). Para além desta grande extensão, a Figura 15

permite observar ao longo do limite N manchas isoladas de Solos Incipientes, das quais uma parte é representada por Litossolos. Dada a dimensão relativamente pequena destas áreas, o seu isolamento e, no caso particular dos Litossolos, a reduzida espessura tipicamente associada (diferenciando-os face aos Aluviosolos e Regossolos e condicionando o ravinamento) optou-se por não as incluir no padrão I.

O padrão II é caracterizado pelo predomínio dos Solos Podzolizados, já referidos como a ordem dominante na área estudada. Apresenta uma grande homogeneidade, com pequenas manchas dispersas de outras ordens, e uma presença reduzida de Solos Hidromórficos, em associação com a rede de drenagem.

O padrão III é caracterizado por um predomínio claro dos Solos Argiluvitados Pouco Insaturados. Ocorre numa extensa área no sector N da área de estudo, e numa mancha isolada situada a S de Montargil. Esta última contém ainda a única extensão de Barros em toda a área de estudo. Dada a reduzida expressão desta Ordem, porém, considerou-se injustificada a criação de um padrão específico.

Os dois padrões restantes são caracterizados pelo predomínio de combinações de solos. No caso do padrão IV, ocupa a orla N da área de estudo e duas pequenas áreas mais a sul, sendo marcado pela alternância de Solos Litólicos, Podzolizados, e Argiluvitados Pouco Insaturados. O padrão V, por fim, caracteriza-se pela quase exclusividade dos Solos Litólicos e Podzolizados em alternância. Ocupa uma grande parte do sector S da área de estudo e uma área significativa no sector NE.

As áreas absolutas e relativas representadas pelos cinco padrões são apresentadas na Tabela 8.

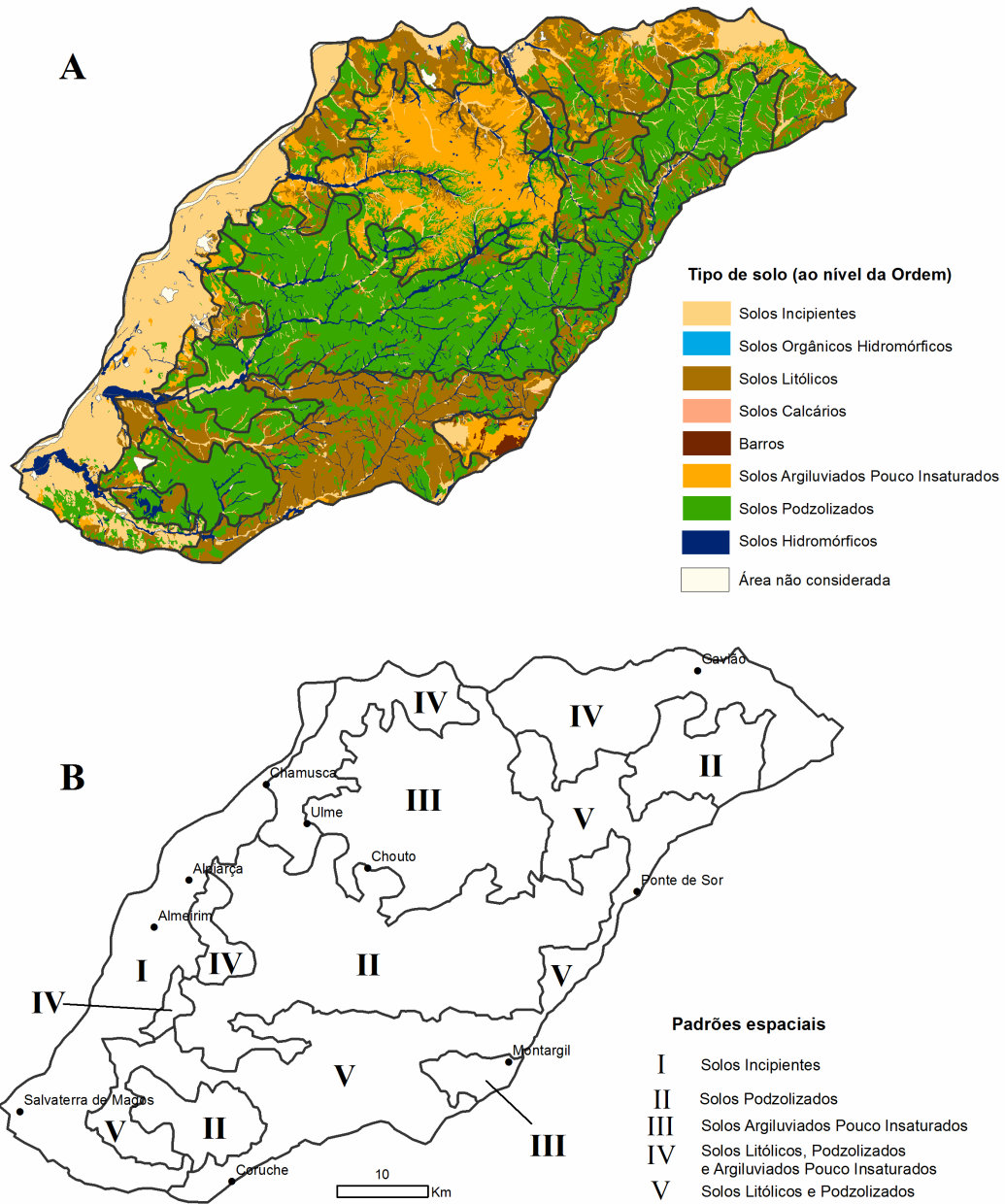


Figura 15 – Os solos na área de estudo: distribuição de tipos de solo (ao nível da Ordem), padrões espaciais delimitados (A), e identificação dos padrões (B).

Tabela 8 – Áreas absolutas e relativas dos padrões de solos delimitados, e das ordens de solos que os constituem. Apenas foram representadas as ordens que ocupam pelo menos 1 % do padrão respectivo.

Padrão	Ordem de Solos	Área	
		Absoluta (ha)	Relativa (%)
I - Solos Incipientes		39480,8	13,55
	Solos Incipientes	28853,3	73,1
	Solos Podzolizados	2510,7	6,4
	Solos Hidromórficos	2715,5	6,9
	Solos Litólicos	1547,0	3,9
	Solos Argiluvitados Pouco Insaturados	702,8	1,8
II - Solos Podzolizados		87552,9	30,06
	Solos Incipientes	3254,4	3,7
	Solos Podzolizados	72731,7	83,1
	Solos Hidromórficos	6023,0	6,9
	Solos Litólicos	3846,0	4,4
	Solos Argiluvitados Pouco Insaturados	1126,4	1,3
III- Solos Argiluvitados Pouco Insaturados		44282,7	15,20
	Solos Incipientes	2389,8	5,4
	Solos Podzolizados	8563,7	19,3
	Solos Hidromórficos	1801,7	4,1
	Solos Litólicos	4978,9	11,2
	Solos Argiluvitados Pouco Insaturados	25571,7	57,7
	Barros	632,4	1,4
IV - Solos Litólicos+Podzolizados+Argiluvitados Pouco Insaturados		52357,1	17,97
	Solos Incipientes	7276,4	13,9
	Solos Podzolizados	13500,6	25,8
	Solos Hidromórficos	1537,7	2,9
	Solos Litólicos	19761,3	37,7
	Solos Argiluvitados Pouco Insaturados	9112,7	17,4
V - Solos Litólicos+Podzolizados		67614,1	23,21
	Solos Incipientes	3541,1	5,2
	Solos Podzolizados	21470,7	31,8
	Solos Hidromórficos	4941,5	7,3
	Solos Litólicos	36097,1	53,4
	Solos Argiluvitados Pouco Insaturados	806,5	1,2

2.4. Resultados

A sobreposição dos temas permitiu definir um total de 131 Unidades Espaciais Homogêneas (UEH), caracterizadas por conjugações específicas dos quatro factores. Estas unidades apresentam uma enorme variabilidade em termos de área ocupada, variando desde um máximo de 541,2 km² a um mínimo de 33 m², com um valor médio de 20,9 km². De forma a tornar observável a variabilidade das suas dimensões e a seleccionar o conjunto das mais importantes para análise, a área relativa acumulada de cada UEH face à área total foi analisada num gráfico de frequências acumuladas (Figura 16). São apresentadas, por ordem decrescente, apenas as 36 UEH que representam individualmente mais do que 0,5% da área em estudo, correspondendo conjuntamente a 93,1% da sua totalidade.

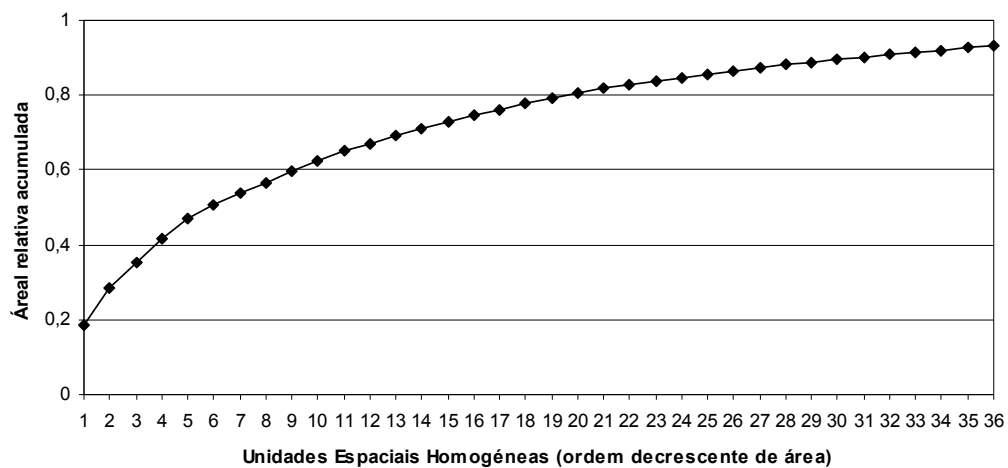


Figura 16 - Área relativa acumulada por UEH com área igual ou superior a 0,5% da área total. Valores obtidos em relação à área total em estudo.

Por fim, e atendendo às limitações logísticas que inevitavelmente se impõem, foram seleccionadas para análise as dez UEH mais importantes. Estas unidades representam 62,3% da área total, sendo a sua localização apresentada na Figura 17. A combinação de factores associada a cada uma, bem as áreas absoluta e relativa, são apresentadas na Tabela 9.

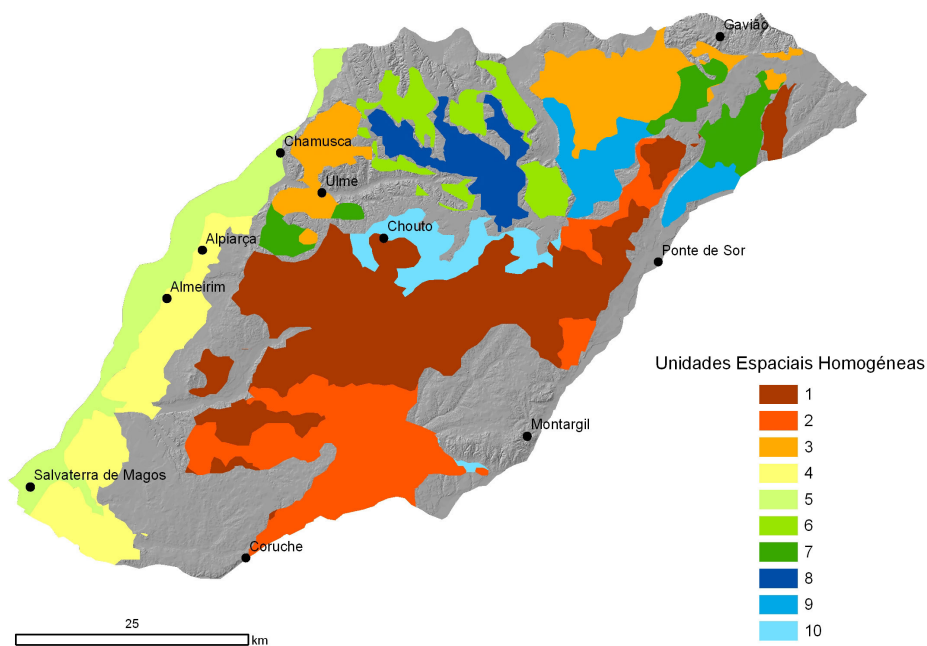


Figura 17 - Localização das dez UEH mais importantes. A área a cinzento diz respeito às restantes 121 UEH não consideradas.

Tabela 9 - Combinações específicas de factores de controlo e áreas associadas às dez UEH mais extensas.

Nº	ITE	IPE	Litologia	Solos	Área (km ²)	% da área total
1	Médio	Valores elevados, baixa densidade	Conglomerados, areias e argilas	Podzolizados	541,2	18,6
2	Médio	Valores elevados, baixa densidade	Conglomerados, areias e argilas	Litólicos + Podzolizados	287,9	9,9
3	Reduzido	Valores elevados, elevada densidade	Conglomerados, areias e argilas	Podzolizados + Litólicos + Argiluvitados Pouco Insaturados	195,1	6,7
4	Elevado	Valores baixos	Quaternário: aluviões, terraços, areias e cascalheiras	Incipientes	187,6	6,4
5	Elevado	Valores muito baixos	Quaternário: aluviões, terraços, areias e cascalheiras	Incipientes	160,6	5,5
6	Reduzido	Valores elevados, elevada densidade	Conglomerados	Argiluvitados Pouco Insaturados	99,1	3,4
7	Reduzido	Valores elevados, elevada densidade	Conglomerados, areias e argilas	Podzolizados	91,1	3,1
8	Elevado	Valores baixos	Conglomerados	Argiluvitados Pouco Insaturados	89,9	3,1
9	Reduzido	Valores elevados, elevada densidade	Conglomerados, areias e argilas	Litólicos+ Podzolizados	87,2	2,9
10	Médio	Valores elevados, baixa densidade	Conglomerados, areias e argilas	Argiluvitados Pouco Insaturados	78,2	2,7

3. Delimitação, validação e caracterização dos padrões de ravinamento

De forma a facilitar a identificação de padrões de ravinamento, optou-se pela utilização de áreas amostrais. Para cada UEH, foi criado um conjunto de áreas amostrais circulares com uma extensão individual de 15 km². Após uma inspeção preliminar de ortofotos da área de estudo, considerou-se ser esta dimensão abrangente o suficiente para permitir uma percepção clara da distribuição de diferentes tipos de formas, e pequena o suficiente para não dificultar uma análise visual sistemática.

O número de áreas amostrais criado para cada UEH foi definido como o necessário para abranger 60% da sua extensão. Foi gerada aleatoriamente uma quantidade de pontos equivalente ao número de áreas desejado, e definidos perímetros a uma distância constante destes¹⁵. Esta distância d (em m) foi obtida resolvendo a equação da área do círculo em ordem ao raio, e definindo a área como 15 km²:

$$d = \sqrt{\frac{15000000}{\pi}}$$

Em função das irregularidades na configuração das UEH e de limitações no algoritmo utilizado¹⁶, não foi possível constringer a geração aleatória de pontos a uma distância mínima de $2.d$ entre cada par de pontos, como seria ideal de forma a evitar sobreposições. De forma a manter ao máximo a aleatoriedade, estabeleceu-se assim uma distância mínima entre os pontos gerados de $1.d$, e foram movidas manualmente apenas as poucas áreas amostrais que apresentavam sobreposição. Esta alteração manual foi sempre realizada segundo o critério de mover prioritariamente as áreas com sobreposição possuindo uma maior parte no exterior da UEH, e centrando-as nas porções vazias mais extensas. Foram geradas, no total, 77 áreas amostrais.

A análise de cada área amostral foi realizada visualmente sobre ortofotos digitais¹⁷. Face à variabilidade morfométrica inerente às formas resultantes do ravinamento, foram consideradas como ravinas as formas entalhadas, não obstante a sua extensão¹⁸. Considerou-se existir um padrão nas situações em que as formas detectadas se apresentaram distribuídas de forma sistemática numa área relativamente extensa, tendo sido adoptada uma extensão mínima aproximada de 1 ha.

¹⁵ Os perímetros foram definidos usando a ferramenta *Buffer* (ArcGIS 9.1).

¹⁶ Foi utilizada a ferramenta *Create Random Points*, integrada no ArcGIS 9.2.

¹⁷ Foram utilizados ortofotos de 2004, com resolução de 0,5 m (Instituto Geográfico Português/Direcção-Geral dos Recursos Florestais).

¹⁸ Dada a resolução da informação (0,5m), as formas menores (i.e. próximas dos diferentes limiares propostos para diferenciar ravinas de sulcos) não são visíveis, pelo que o padrão observado corresponde inequivocamente a ravinas, não obstante o critério mínimo pelo qual se opte.

A análise efectuada permitiu eliminar 43 das áreas amostrais geradas como não apresentando ravinas de forma significativa, e delimitar por meio de polígonos 55 padrões de ravinamento nas 34 áreas amostrais restantes¹⁹. É de referir que a não definição de qualquer polígono numa área amostral não implicou a inexistência de ravinas, mas apenas a sua ocorrência de forma dispersa e não sistemática ao longo dos 15 km² considerados e/ou o facto de a percepção das formas ser impossibilitada pelo coberto vegetal, e muito em especial pelos usos florestais claramente dominantes na área de estudo²⁰. Nos casos em que o grau de entalhe dos canais não se revelou claramente perceptível, optou-se por não delimitar qualquer padrão. A análise realizada assentou assim na premissa implícita de que os padrões delimitados são representativos da área de estudo, não havendo qualquer controlo sobre esta representatividade por parte do coberto (i.e. não havendo padrões sistematicamente associados a certos tipos de coberto vegetal, e não detectados em função deste).

Após a delimitação dos 55 padrões (i.e. polígonos), foi seleccionado aleatoriamente um conjunto de 33, equivalente a 60% do total (Figura 18). Estes foram sistematicamente verificados no terreno e caracterizados quanto à morfologia, posição relativa e dinâmica das formas segundo o conjunto de parâmetros apresentado na Tabela 10, e em acordo com a definição de padrão de ravinamento adoptada no início do Capítulo (i.e. *a conjugação entre morfometria, posição relativa e dinamismo que caracteriza as formas observáveis numa dada unidade espacial*).

¹⁹ De acordo com a definição apresentada no início do Capítulo e o âmbito espacial mínimo aqui definido, cada um destes 55 padrões correspondeu a uma área com uma extensão mínima de 1 ha apresentando ravinamento de forma sistemática. Cada um destes padrões de ravinamento caracteriza-se pela conjugação entre morfometria, posição relativa e dinamismo das formas erosivas nele observáveis.

²⁰ De acordo com a cartografia CORINE Land Cover de 2006, as Florestas de Folhosas (classe 311), Áreas Florestais Degradadas, Cortes e Novas Plantações (324), Florestas Mistas (313) e Florestas de Resinosas (321) ocupam respectivamente 39,5%, 14,9%, 8,4%, e 0,9% da área de estudo, perfazendo um total de 63,7% de toda a área.

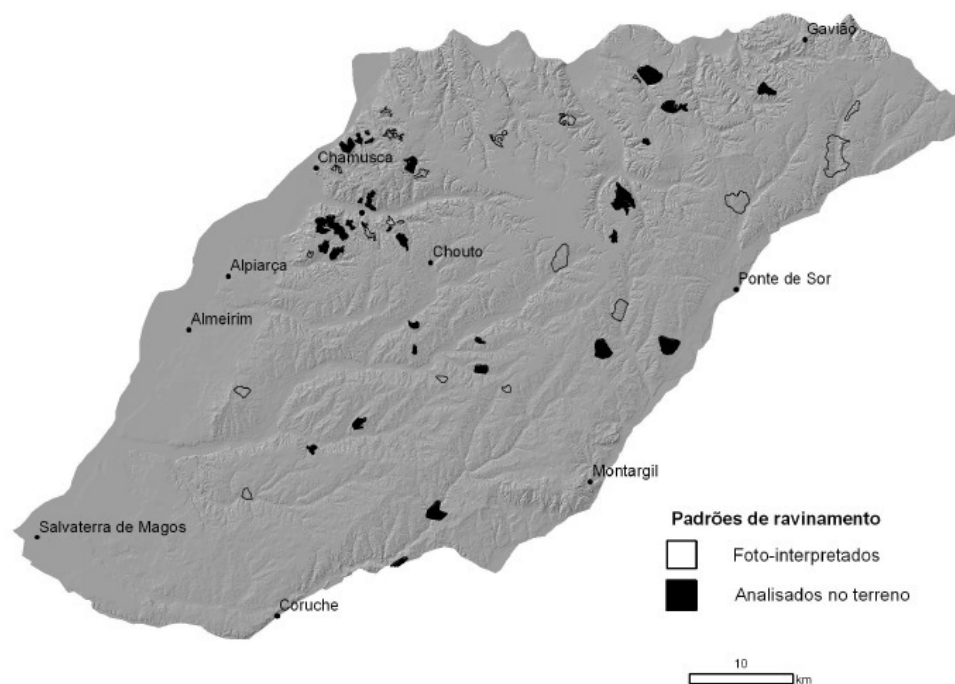


Figura 18 – Padrões de ravinamento foto-interpretados, e a fracção sujeita a análise de campo.

Para além de permitir avaliar o actual grau de actividade das formas (por oposição àquela aparente em 2004, data do voo) esta análise de campo permitiu aferir até que ponto as numerosas formas entalhadas de grandes dimensões que aparentam estar relativamente estabilizadas na foto-interpretação apresentam sinais indicativos de instabilidade e erosão, designadamente depósitos de material ao longo do fundo, e sectores das paredes declivosos com o rególito exposto e/ou pequenos interflúvios em evidência, indícios de processos de movimento de massa e erosão hídrica ainda não totalmente estabilizados (Figura 19). Só nestes casos as formas foram consideradas ravinas (de acordo com a definição adoptada²¹). Nos casos em que estes sinais não se apresentaram, verificaram-se três situações: as formas não se mostraram entalhadas; apenas se apresentaram entalhadas o suficiente numa pequena porção do padrão delimitado; ou apresentaram-se entalhadas numa porção significativa da área delimitada, sendo assim consideradas como possíveis paleo-ravinas, hoje totalmente inactivas²² (Figura 20). Em quaisquer destes casos, os padrões foram eliminados.

²¹ De acordo com a análise crítica da literatura realizada, definiu-se ravina como *um canal relativamente fundo, instável e em processo de erosão que evolui através da conjugação entre um escoamento efêmero em contextos de alimentação em precipitação, e movimentos de massa* (vd. 1.6).

²² Por uma questão de definição, estas formas não foram encaradas como ravinas. Situação oposta ocorre, por exemplo, nos trabalhos de Vanwalleghem *et al.* (2003: 20; 2008: 507), centrados em formas totalmente estabilizadas na Bélgica.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados na caracterização dos padrões de ravinamento.

Parâmetro	Classes	
Tipo	Incipientes: formas com profundidades de até $\approx 0,5$ m e carácter linear.	
	Desenvolvidas: formas com profundidades superiores a $\approx 0,5$ m.	
Organização	Formas simples	Isoladas: formas não organizadas em redes ou com ramificação incipiente.
		Ramificadas: a maioria das formas organiza-se em sistemas hierárquicos bem definidos.
		Isoladas+Ramificadas: sem predomínio claro de um dos modos de organização.
	Formas em complexos: para os mesmos limites, formas com mais do que uma cabeceira e um canal, separados por interflúvios topograficamente inferiores à superfície envolvente.	
Dimensão ¹	Pequenas a médias: formas com tendencialmente extensões longitudinais <30 m	
	Médias a grandes: formas com tendencialmente extensões longitudinais >30 m	
	Muito grandes: formas com centenas de m de comprimento e pelo menos vários metros de largura.	
Actividade	Activas: generalidade das formas sem ou com pouca vegetação e com a generalidade dos limites bem marcada ² .	
	Parcialmente activas: generalidade das formas tem sectores dominados pela vegetação, mas outros expostos e bem marcados; nos complexos, as paredes são declivosas e expostas, mas com fundo dominado pela vegetação.	
	Inactivas: a generalidade das formas tem os canais suavizados e cobertos de vegetação.	
	Variável: na mesma área coexistem formas nas várias classes, sem predomínio claro de qualquer uma delas.	

¹ Para formas ramificadas, a classe refere-se à rede, e não a cada ravina individual.

² Uma forma foi considerada activa mesmo não possuindo um canal entalhado, desde que este estivesse livre de vegetação, assumindo-se nestes casos a coesão do material como factor limitador do entalhe.

O conhecimento das relações entre as formas foto-interpretadas e a realidade permitiu caracterizar os restantes 22 padrões com base nas semelhanças com os 33 padrões previamente seleccionados e já observados, de que são mostrados dois exemplos na Figura 21. No total, foram eliminados sete dos padrões inicialmente delimitados, pelas três razões já descritas. Ao mesmo tempo, a observação das formas no campo levou à individualização de sete novos padrões a partir dos iniciais, devido a diferenças significativas entre conjuntos de formas dentro do mesmo padrão, ou por forma a eliminar grandes áreas entre grupos de formas que abrangem por si mais do que a área mínima arbitrariamente considerada necessária (1 ha). No final, obtiveram-se igualmente 55 padrões (Figura 22), cujas características são apresentadas na Tabela 11. No Anexo 1 é apresentado um mapa de maiores dimensões com a localização de cada um dos 55 padrões, o seu enquadramento face à respectiva folha da Carta Militar 1:25000, e um número identificador, permitindo estabelecer correspondência entre padrões específicos e as suas características (Tabela 11).

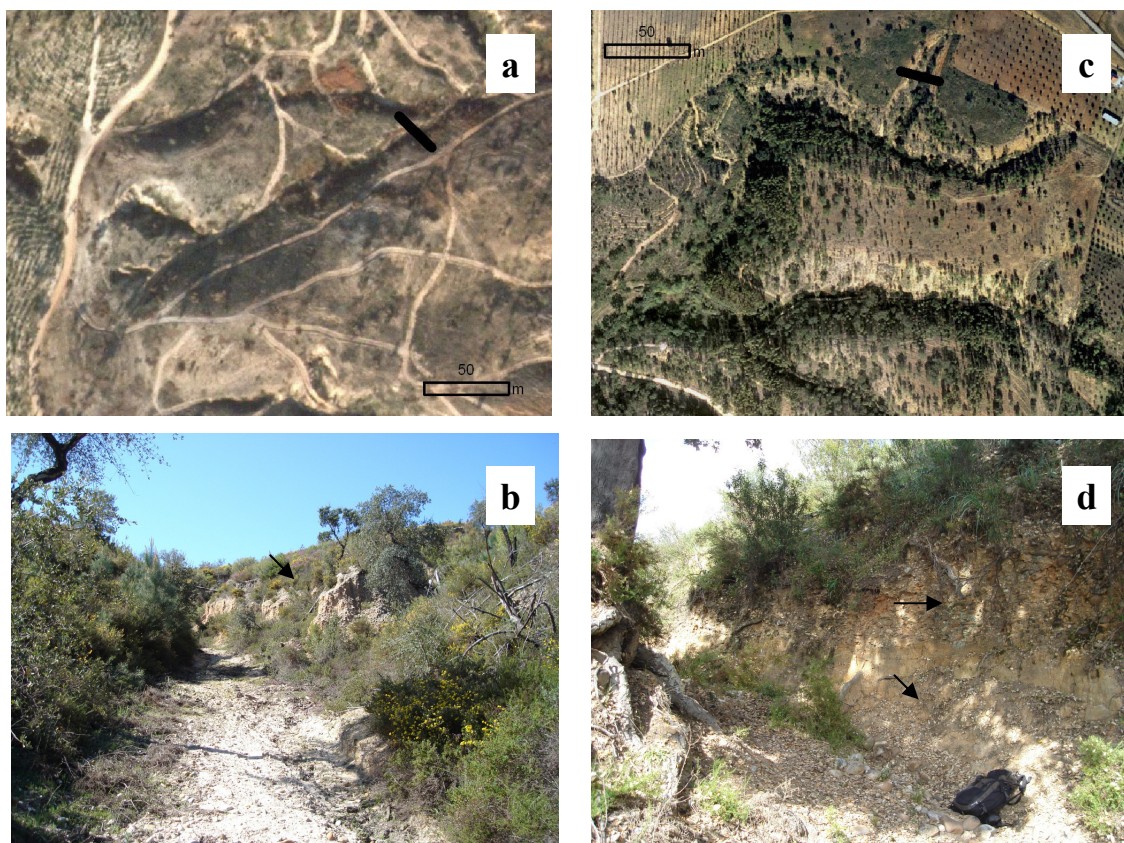


Figura 19 – Indicadores de erosão passada: sectores declivosos com o rególito exposto, depósitos e pequenos interflúvios residuais ao longo das paredes de antigas ravinas. (a) freguesia de Ulme (Chamusca); (b) vista do interior do canal; (c) freguesia de S. Facundo (Abrantes); (d) vista do interior do canal. As barras pretas em (a) e (c) indicam os locais aproximados de onde as fotografias foram tiradas.

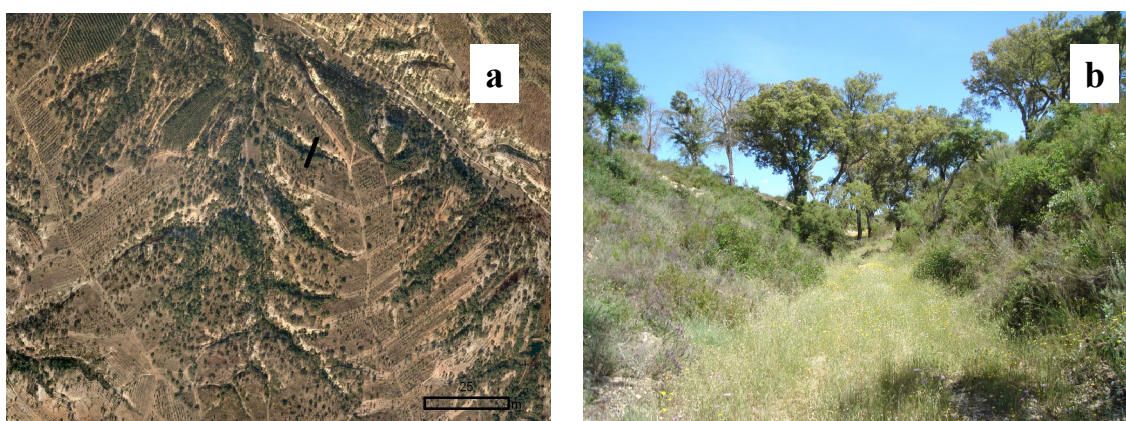


Figura 20 – Exemplo de um padrão associado a paleo-ravinamento. Apesar do carácter entalhado da rede de canais na ortofoto (a), visível no perfil transversal em V (b), a ausência dos indicadores de erosão já referidos levou a que este padrão não fosse considerado como apresentando ravinas, mas sim paleo-ravinas, hoje totalmente estabilizadas. Perfil em (b) corresponde aproximadamente à posição da barra a preto em (a). Freguesia da Bemposta, Abrantes.

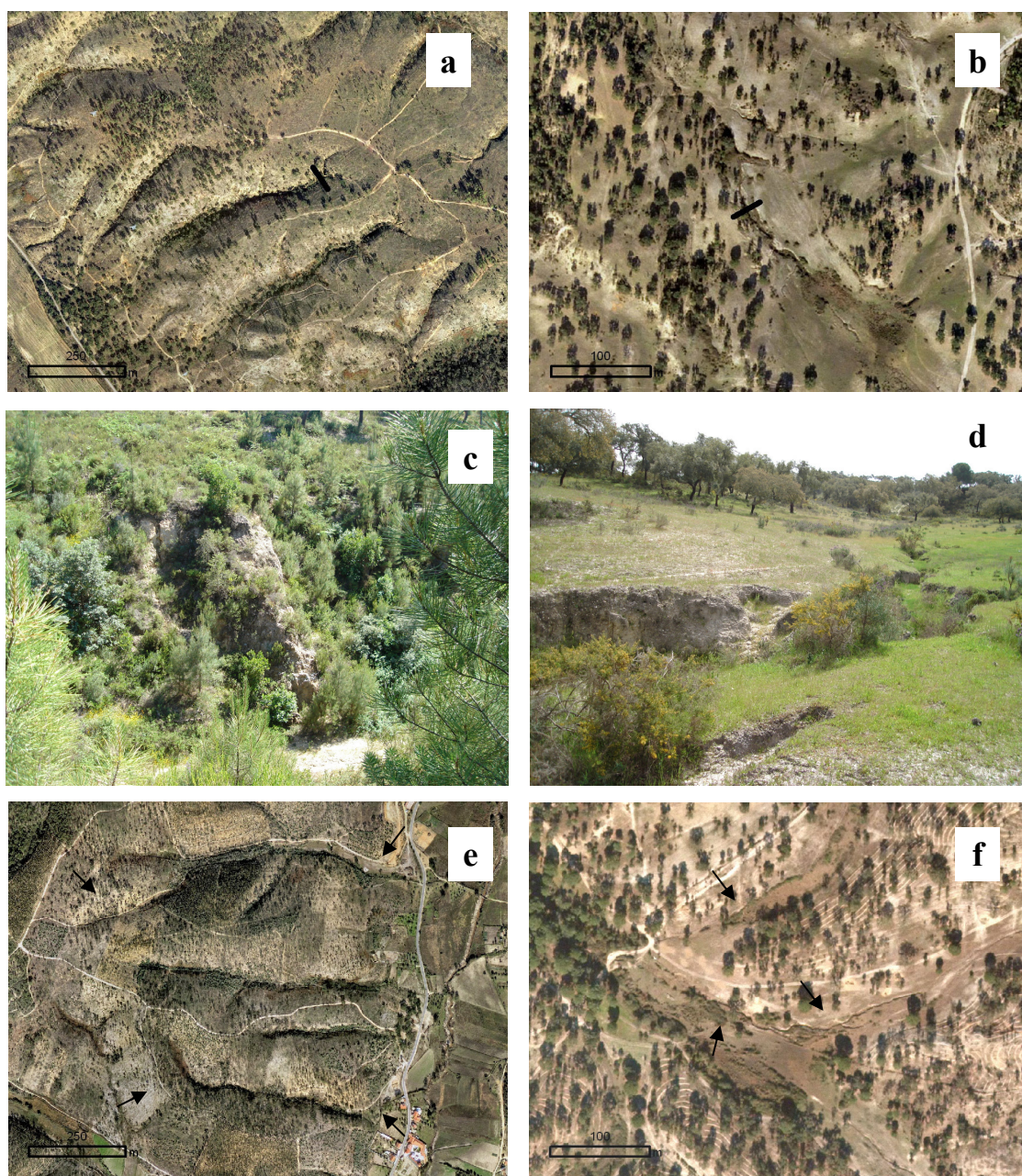


Figura 21 – Dois exemplos da caracterização de padrões foto-interpretados com base na análise de campo de padrões análogos. (a) e (b): padrões observados no campo, respectivamente nas freguesias de Pego (Abrantes) e Raposa (Almeirim). As barras a negro correspondem aproximadamente à localização de onde foram tiradas as fotografias em (c) e (d). (e) e (f) representam padrões assumidos como semelhantes e portanto caracterizados da mesma forma, nas freguesias da Margem (Gavião) e Chouto (Chamusca). As características de cada um são apresentadas na Tabela 11, de acordo com o número associado ao padrão: (a) - 9; (b) - 51; (e) - 27; (f) - 53.

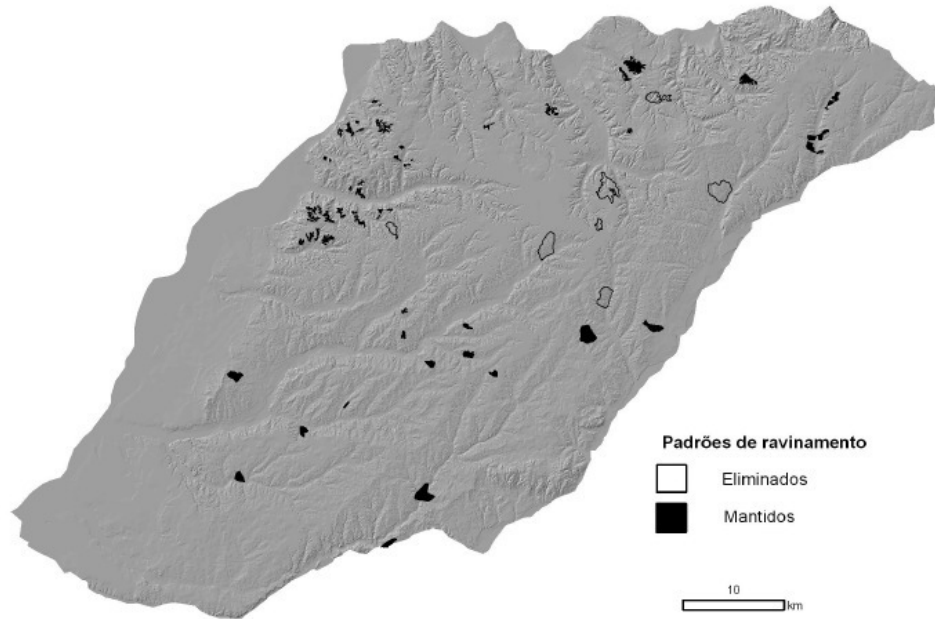


Figura 22 – Os padrões de ravinamento eliminados e o conjunto final de 55.

Importa nesta altura salientar a questão da actividade antrópica. Como foi referido, a análise dos 33 padrões no campo permitiu aferir a relação entre a actividade aparentada nas ortofotos de 2004 e a realidade em 2011. Na posterior classificação dos restantes 22 padrões com base na semelhança entre morfologias foto-interpretadas, foi assumida a mesma relação. Porém, é possível que a acção antrópica no período entretanto decorrido tenha tido um papel determinante sobre esses padrões, tanto no grau de actividade das formas (e.g. cessando a actividade agrícola que lhes promovia o crescimento), como na sua própria existência, particularmente no caso das formas de menores dimensões (eliminando-as com recurso a maquinaria agrícola). Os resultados desta classificação assentam assim na assunção implícita de que, à semelhança do que foi observado nos padrões validados, a influência humana não produziu no período decorrido modificação significativa nas formas foto-interpretadas ou na sua dinâmica.

Tabela 11 - Características das formas associadas aos 55 padrões de ravinamento finais. A numeração (1-55) é correspondida por aquela apresentada no mapa que constitui o Anexo 1, permitindo localizar os padrões na área de estudo. Parâmetros (cf. Tabela 10) - Tipo: *des* (desenvolvidas), *inc* (incipientes); Organização: *ram* (ramificadas), *iso* (isoladas), *comp* (complexos); Dimensão: *mtogra* (muito grandes), *medgra* (médias a grandes), *peqmed* (pequenas a médias); Actividade: *inact* (inactivas), *parc_act* (parcialmente activas), *act* (activas). Validação campo: s (sim), n (não). A ocorrência de mais do que uma classe separada por uma barra (e.g. *ram/comp*) implica que ambas foram observadas.

Nº	Tipo	Organização	Dimensão ravinias	Dimensão complexos	Actividade ravinias	Actividade complexos	Validação campo
1	des	ram	mtogra	-----	inact	-----	s
2	des	ram/comp	mtogra	peqmed	inact	inact	s
3	des	comp	-----	medgra	-----	parc_act	s
4	des	ram/comp	mtogra	medgra	inact	inact	s
5	des	ram/comp	mtogra	medgra	inact	inact	s
6	des	ram/comp	mtogra	medgra	inact	parc_act	s
7	des	iso	medgra	-----	parc_act	-----	s
8	des	ram	mtogra	-----	inact	-----	s
9	des	iso	mtogra	-----	inact	-----	s
10	des	ram	mtogra	-----	inact	-----	s
11	des	ram	mtogra	-----	inact	-----	s
12	des	iso	mtogra	-----	inact	-----	s
13	des	iso	mtogra	-----	inact	-----	s
14	des	ram	mtogra	-----	inact	-----	s
15	des	comp	-----	medgra/ mtogra	-----	parc_act	s
16	des	comp	-----	medgra	-----	parc_act	s
17	des	isso/comp	mtogra	peqmed	inact	parc_act	s
18	des	ram/comp	mtogra	peqmed/ medgra	inact	parc_act	s
19	des	comp	-----	medgra	-----	parc_act	s
20	des	ram/comp	mtogra	peqmed	inact	inact	s
21	des	comp	-----	medgra/ mtogra	-----	parc_act	s
22	des	ram/comp	mtogra	medgra/ mtogra	inact	parc_act	s
23	des	ram/comp	mtogra	peqmed	inact	parc_act	s
24	des	comp	-----	medgra	-----	parc_act	s
25	des	iso	mtogra	-----	inact	-----	s
26	des	comp	-----	mtogra	-----	parc_act	s
27	des	iso	mtogra	-----	inact	-----	n

Tabela 11 (cont.)

Nº	Tipo	Organização	Dimensão ravinias	Dimensão complexos	Actividade ravinias	Actividade complexos	Validação campo
28	des	iso	mtogra	-----	inact	-----	n
29	des	comp	-----	peqmed/ medgra	-----	parc_act	n
30	des	comp	-----	medgra	-----	parc_act	n
31	des	ram/comp	mtogra	peqmed	inact	parc_act	n
32	des	comp	-----	mtogra	-----	parc_act	n
33	des	iso/comp	mtogra	peqmed/ medgra	inact	parc_act	n
34	des	iso	mtogra	-----	inact	-----	n
35	des	iso/comp	mtogra	medgra	inact	parc_act	n
36	des	iso/ram	mtogra	-----	inact	-----	n
37	des	ram/comp	mtogra	medgra	inact	parc_act	n
38	des	ram/comp	mtogra	medgra	inact	parc_act	n
39	des	iso/comp	mtogra	peqmed	inact	inact	n
40	des	comp	-----	medgra	-----	parc_act	n
41	des	comp	-----	medgra	-----	parc_act	n
42	des	iso/comp	mtogra	peqmed	inact	parc_act	n
43	des	ram/comp	mtogra	medgra	inact	parc_act	s
44	inc	ram	medgra	-----	act	-----	s
45	inc	ram	medgra	-----	parc_act	-----	s
46	inc/des	ram	peqmed/ medgra	-----	act	-----	s
47	inc/des	iso/ram	medgra	-----	act	-----	s
48	inc	iso	peqmed	-----	inact	-----	s
49	inc/des	iso	peqmed/ medgra	-----	act	-----	s
50	inc/des	iso/ram	peqmed/ medgra	-----	parc_act	-----	s
51	inc/des	iso/ram	peqmed/ medgra	-----	parc_act	-----	s
52	inc	ram	medgra	-----	act	-----	n
53	inc/des	iso/ram	peqmed/ medgra	-----	parc_act	-----	n
54	des	iso	medgra	-----	parc_act	-----	n
55	inc	iso	medgra	-----	act	-----	n

As características dos padrões encontrados estão sintetizadas nas tabelas 12 a 19, e são descritas de seguida.

A análise da tabela 12 mostra que existe um predomínio muito claro das formas desenvolvidas, ocorrendo em 90,9% de todos os padrões, e apresentando-se em 10,9% em combinação com formas incipientes. Os padrões com formas exclusivamente incipientes representam apenas 9,1% do total.

No que diz respeito ao modo de organização (Tabela 13), 40% de todos os padrões (22) apresentam formas isoladas (em exclusivo ou não), ocorrendo formas ramificadas em 47,3%

dos casos (26). Apenas em 5 padrões (9,1% do total) considerou-se existirem combinações de formas isoladas e ramificadas.

A tabela 12 permite observar que, dos 44 padrões com formas consideradas desenvolvidas, 66% apresentam complexos de ravinas. Estes apresentam-se como as formas exclusivas em cerca de um quinto de todos os padrões (21,8%, cf. Tabela 13) e combinam-se com formas simples em 30,9% dos casos. No total, ocorrem complexos em 52,7% de todos os padrões observados (Tabela 13), o que atesta a relevância destas formas no contexto do ravinamento na área de estudo.

No que diz respeito à dimensão e considerando apenas as ravinas não organizadas em complexos, é de salientar a predominância das formas Muito Grandes (centenas de m de comprimento e vários m de largura) (Tabela 14). Estas caracterizam 30 dos padrões analisados (54,5% do total), que correspondem também a 93,8% de todos os padrões onde só ocorrem formas desenvolvidas (30 num total de 32).

No caso dos complexos (Tabela 15), o predomínio é das formas Médias a Grandes, ocorrendo em 20 padrões (36,4% do total), dos quais 6 apresentam combinações com formas maiores (3) e menores (3). Destes 20 padrões, 10 consistem em combinações de complexos com ravinas simples.

Dos 10 padrões que incluem complexos pequenos a médios (i.e. menos de 30 m de extensão longitudinal, cf. Tabela 10), apenas em um caso estes não se apresentam em combinação com ravinas simples.

Tabela 12 - Tipos de formas encontradas e modos de organização. Abreviações das características das formas são as mesmas já descritas na legenda da Tabela 11.

Tipo	Nº de padrões	% do total (55)	% tipo
Incipientes	5	9,1	100
Isoladas	2	3,6	40,0
Ramificadas	3	5,5	60,0
Desenvolvidas	44	80	100,0
Isoladas	9	16,4	20,5
Ramificadas	5	9,1	11,4
Iso/Ram	1	1,8	2,3
Complexos	12	21,8	27,3
Iso/Comp	5	9,1	11,4
Ram/Comp	12	21,8	27,3
Incipientes+ Desenvolvidas	6	10,9	100,0
Isoladas	1	1,8	16,7
Ramificadas	1	1,8	16,7
Iso/Ram	4	7,3	66,7

Tabela 13 - Modos de organização.

Organização	Nº de padrões	% do total (55)
Isoladas	12	21,8
Ramificadas	9	16,4
Iso/Ram	5	9,1
Complexos	12	21,8
Iso/Comp	5	9,1
Ram/Comp	12	21,8

Tabela 14 - Nº de padrões por classe de dimensão das ravinas, por tipo e modo de organização.

Tipo	Organização	Peqmed	Peqmed/ Medgra	Medgra	Mtogra	Total
Incipientes	Iso	1	...	1	...	2
	Ram	...	...	3	...	3
Desenvolvidas	Iso	...	...	2	7	9
	Ram	...	...	...	5	5
	Iso/Ram	...	...	...	1	1
	Iso/Comp	...	...	...	5	5
	Ram/Comp	...	...	...	12	12
Incipientes/ Desenvolvidas	Iso	...	1	...	...	1
	Ram	...	1	...	...	1
	Iso/Ram	...	3	1	...	4
Total		1	5	7	30	43
% Total padrões (55)		1,8	9,1	12,7	54,5	78,2

Tabela 15 – Nº de padrões por classe de dimensão dos complexos, por modo de organização (todos os padrões apresentam formas desenvolvidas).

Organização	Peqmed	Peqmed/ Medgra	Medgra	Medgra/ Mtogra	Mtogra	Total
Complexos	...	1	7	2	2	12
Iso/Comp	3	1	1	...	...	5
Ram/Comp	4	1	6	1	...	12
Total	7	3	14	3	2	29
% Total padrões (55)	12,7	5,5	25,5	5,5	3,6	52,7

Tabela 16 – Nº de padrões por classe de actividade das ravinas, por tipo e modo de organização.

Tipo	Organização	Activas	Parc_act	Inactivas	Total
Incipientes	Isoladas	1	...	1	2
	Ramificadas	2	1	...	3
Desenvolvidas	Isoladas	...	2	7	9
	Ramificadas	...	...	5	5
	Isol.+Ramif.	...	...	1	1
	Isol.+Comp	...	...	5	5
	Ramif.+Comp	...	...	12	12
Incipientes+ Desenvolvidas	Isoladas	1	...	...	1
	Ramificadas	1	...	...	1
	Isol.+Ramif.	1	3	...	4
Total		6	6	31	43
% Total padrões (55)		10,9	10,9	56,4	78,2

Tabela 17 – N° de padrões por classe de actividade dos complexos, por modo de organização (todos os padrões correspondem a formas desenvolvidas).

Organização	Activos	Parc_act	Inactivos	Total
Comp	...	12	...	12
Iso/comp	...	4	1	5
Ram/comp	...	8	4	12
Total	...	24	5	29
% Total padrões (55)	...	43,6	9,1	52,7

Tabela 18 – N° de padrões por classe de actividade, dimensão e tipo: ravinas

	Dimensão	Activas	Parc_act	Inactivas	Total
Incipientes	Peq_med	...	...	1	1
	Medgra	3	1	...	4
Desenvolvidas	Medgra	...	2	...	2
	Mtogra	...	...	30	30
Incipientes/ desenvolvidas	Peqmed/Medgra	2	3	...	5
	Medgra	1	...	...	1
	Total	6	6	31	43
	% Total padrões (55)	10,9	10,9	56,4	78,2

Tabela 19 – N° de padrões por classe de actividade e dimensão: complexos

Dimensão	Activos	Parc. Activos	Inactivos	Total
Peqmed	...	4	3	7
Peqmed/Medgra	...	3	...	3
Medgra	...	12	2	14
Medgra/mtogra	...	3	...	3
Mtogra	...	2	...	2
Total	...	24	5	29
% Total padrões (55)	...	43,6	9,1	52,7

No que diz respeito à actividade, e considerando apenas as ravinas, a Tabela 16 torna claro que predominam as formas inactivas, correspondendo a 56,4% de todos os padrões, e ocorrendo quase em exclusividade nas formas desenvolvidas. Dos 11 padrões associados a formas incipientes ou a combinações de formas incipientes e desenvolvidas, apenas em 1 se observou inactividade, apresentando-se todos os restantes activos ou parcialmente activos. A Tabela 18 torna clara a associação entre ravinas de grandes dimensões e inactividade, já que em todos os 30 padrões com ravinas muito grandes estas se apresentaram inactivas.

No que diz respeito aos complexos (Tabelas 17 e 19), é claro o domínio das formas parcialmente activas. Estas correspondem a complexos cujas paredes se apresentam declivosas e maioritariamente desprovidas de vegetação, mas cujo fundo está dominado pelo coberto vegetal. Dos 29 padrões com complexos, 24 apresentam formas nesta classe de

actividade, apresentando-se os restantes 5 inactivos (Tabela 17). Não parece haver relação entre a dimensão destas formas e o grau de actividade, já que os complexos parcialmente activos ocorrem em todas as classes de dimensão observadas (Tabela 19). A Figura 23 apresenta dois exemplos de inactividade e actividade parcial em complexos de ravinas.

Em suma, a análise conjunta dos vários parâmetros expressos nas Tabelas 12-19 permite obter uma noção generalizada das características que o ravinamento adquire na área de estudo:

- (1) claro predomínio das formas desenvolvidas, por oposição a formas incipientes (tal como aquelas frequentemente associadas na literatura a áreas agricultadas);
- (2) entre os padrões apresentando ravinas simples, predominam aqueles com ravinas de grandes dimensões (hectométricas) apresentando-se estas formas actualmente inactivas;
- (3) por oposição às ravinas de dimensões Muito Grandes, as ravinas menores apresentam-se na sua maioria total ou parcialmente activas;
- (4) os complexos de ravinas têm uma expressão importante face ao ravinamento na área de estudo. Estes sistemas caracterizam pouco mais de metade de todos os padrões analisados, apresentam-se sobretudo com dimensões Médias a Grandes e frequentemente em combinação com formas simples, e mostraram-se na sua grande maioria parcialmente activos.

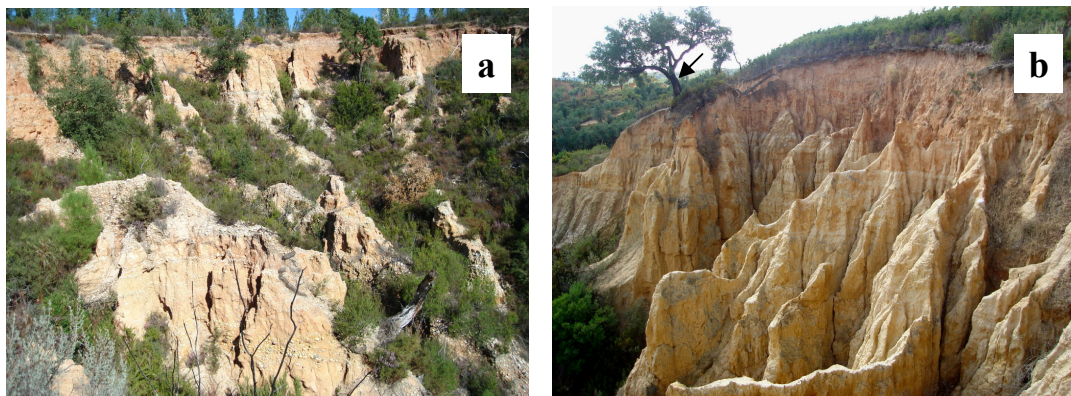


Figura 23 - Complexo de ravinas: (a) Classificado como inactivo; notar interflúvios dominados pela vegetação, que se estende por vezes até ao limite superior da cabeceira (freguesia de Ulme, Chamusca); (b) Classificado como parcialmente activo; apesar dos fundos dominados pela vegetação, as paredes apresentam-se declivosas e nuas, neste caso a evoluir através de *fluting* (vd. I.4.2); notar sobreiro jovem parcialmente desenraizado e isolado num pequeno interflúvio pelo recuo da cabeceira (freguesia de Pinheiro Grande, Chamusca).

3.1. Padrões Gerais de Ravinamento

A fim de construir a perspectiva de conjunto que constitui o objectivo desta parte da investigação, a informação nas tabelas 12 a 19 foi combinada com a análise visual sistemática dos 55 padrões nas ortofotos e de um Modelo Digital de Elevação da área de estudo

(resolução de 10 m) construído a partir das curvas de nível da Carta Militar 1:25000. Pretendeu-se assim, com base em características comuns, agrupar os 55 padrões individuais já descritos em um número menor de padrões gerais, aqui designados Padrões Gerais de Ravinamento (PGR), e considerados como os grandes padrões assumidos pelo fenómeno do ravinamento na área de estudo.

A análise deixou clara desde o início uma relação fundamental entre a diferenciação de padrões de ravinamento e a evolução da rede de drenagem. Esta evolução é marcada pelo entalhe e o recuo da superfície culminante da área de estudo, definida em termos lito-estratigráficos pelos conglomerados pliocénicos designados "Conglomerados da Serra de Almeirim" (vd. II.2.2.). Correlacionado com o recuo desta superfície está um aumento progressivo das áreas de afloramento dos arenitos e argilas subjacentes, atribuídos respectivamente ao Pliocénico (Arenitos de Ulme²³) e Miocénico (Argilas de Tomar) (Figura 14).

A análise permitiu individualizar 8 padrões gerais de ravinamento (PGR), designados com letras de A a H e caracterizados de seguida. A sua distribuição espacial é apresentada na Figura 24.

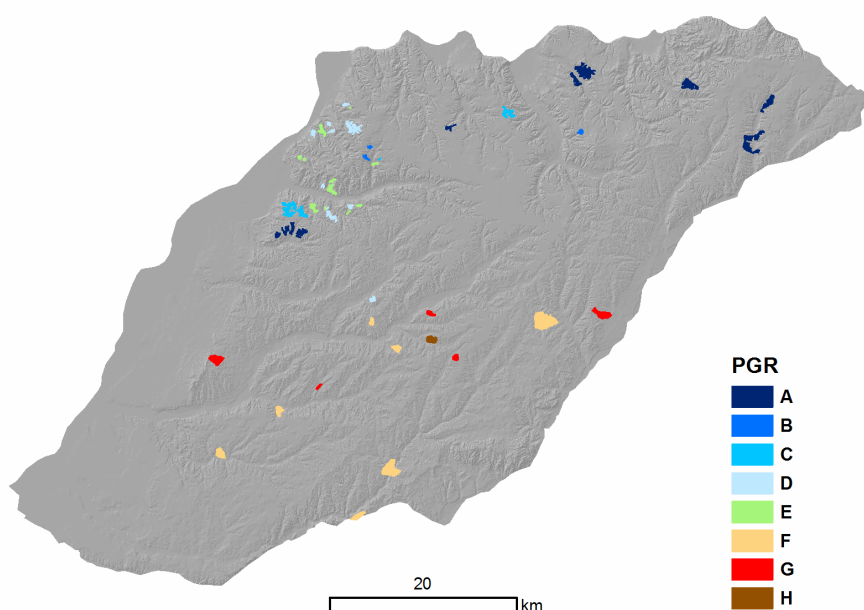


Figura 24 - Distribuição espacial dos Padrões Gerais de Ravinamento na área de estudo.

²³ É aqui de referir que, embora os Conglomerados da Serra de Almeirim se sobreponham aos Arenitos de Ulme, os segundos constituem essencialmente as fácies mais distais dos primeiros, sendo ambos em grande parte contemporâneos. De acordo com Martins (2004: 51) a sedimentação na bacia do Baixo Tejo proveio do NE, levando a que, num sentido NE-SW, os materiais mais grosseiros e requerendo maior capacidade de transporte tivessem sido gradualmente substituídos por materiais mais finos. Como consequência, os maiores afloramentos de arenitos ocorrem presentemente nos sectores SW da área de estudo (Figura 14), onde os Conglomerados da superfície culminante, menos espessos e mais facilmente erodidos, apresentam uma presença reduzida aos topos das elevações.

O PGR A consiste em ravinas Muito Grandes (centenas de m de extensão e vários m de largura), isoladas ou com uma ramificação incipiente. Topograficamente, as cabeceiras destas formas entalham a superfície culminante. Os canais têm profundidades de poucos metros e apresentam-se actualmente estabilizados, mostrando ainda sinais de erosão passada (Figura 25).

Os padrões de tipo A foram definidos em diferentes locais, desde a rib^a do Carvalhal, próximo de Vale de Cavalos, até às ribeiras de Coalhos e da Lampreia (que atingem o Tejo nas proximidades de Abrantes e Alvega, ao longo do seu troço E-W), e à rib^a da Margem, tributária do Rio Sor.

O PGR B é igualmente caracterizado pela presença de ravinas Muito Grandes, mas de dimensões superiores a A. As formas organizam-se em rede, entalhando a superfície culminante, e estão presentemente estabilizadas (Figura 26). Foram definidos padrões de tipo B no Vale de Pai Poldro (rib^a de Ulme), e na rib^a dos Vales, tributária do Rio Torto, próximo de S. Facundo.

O PGR C é bastante semelhante a B, consistindo igualmente em ravinas de dimensões hectométricas, em rede, e entalhando as áreas de planalto da superfície culminante. Porém, este padrão é marcado pela presença generalizada de complexos de ravinas ao longo das paredes dos canais (Figura 27). Embora, tal como nos PGR A e B, as ravinas estejam presentemente inactivas, os complexos apresentam actividade pelo menos parcial, com cabeceiras bem marcadas e paredes declivosas e sem vegetação, apesar do fundo dominado pelo coberto vegetal. Foram definidos padrões deste tipo no rio Torto, no Vale do Pai Poldro (rib^a de Ulme), e em maior concentração na margem esquerda do sector terminal da rib^a de Ulme, junto à confluência com a vala do Paul, onde as formas drenam para os dois cursos de água.

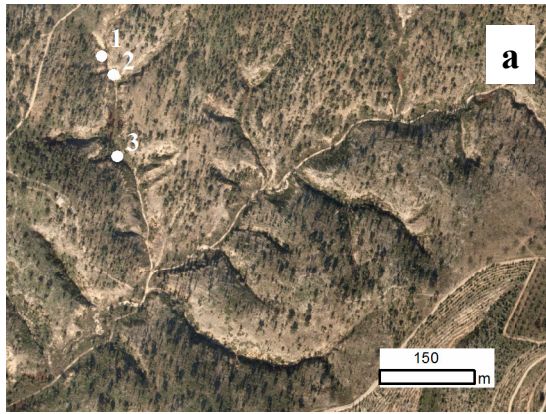


Figura 25 - Exemplo de um PGR de tipo A: (a) perspectiva geral na ortofoto (freguesia de Vale de Cavalos, Chamusca); (b) interior de um dos canais, correspondente ao ponto 1 em (a); (c) uma bifurcação no canal, correspondente ao ponto 2 em (a); fotografia tirada para NE; (d) sinais de instabilidade na parede do canal, correspondendo ao ponto 3 em (a): depósitos provenientes de movimentos de massa, sectores declivosos sem vegetação. Outros exemplos de padrões análogos estão patentes na Figura 21 (a), (c) e (e). Este padrão tem o nº11 no mapa que constitui o Anexo 1.



Figura 26 – Exemplo de um PGR de tipo B: (a) perspectiva geral na ortofoto (freguesia de Ulme, Chamusca); (b) Sinais de erosão passada na parede de um dos canais, correspondente ao ponto assinalado com a seta em (a). Padrão assinalado com o nº1 no mapa do Anexo 1.

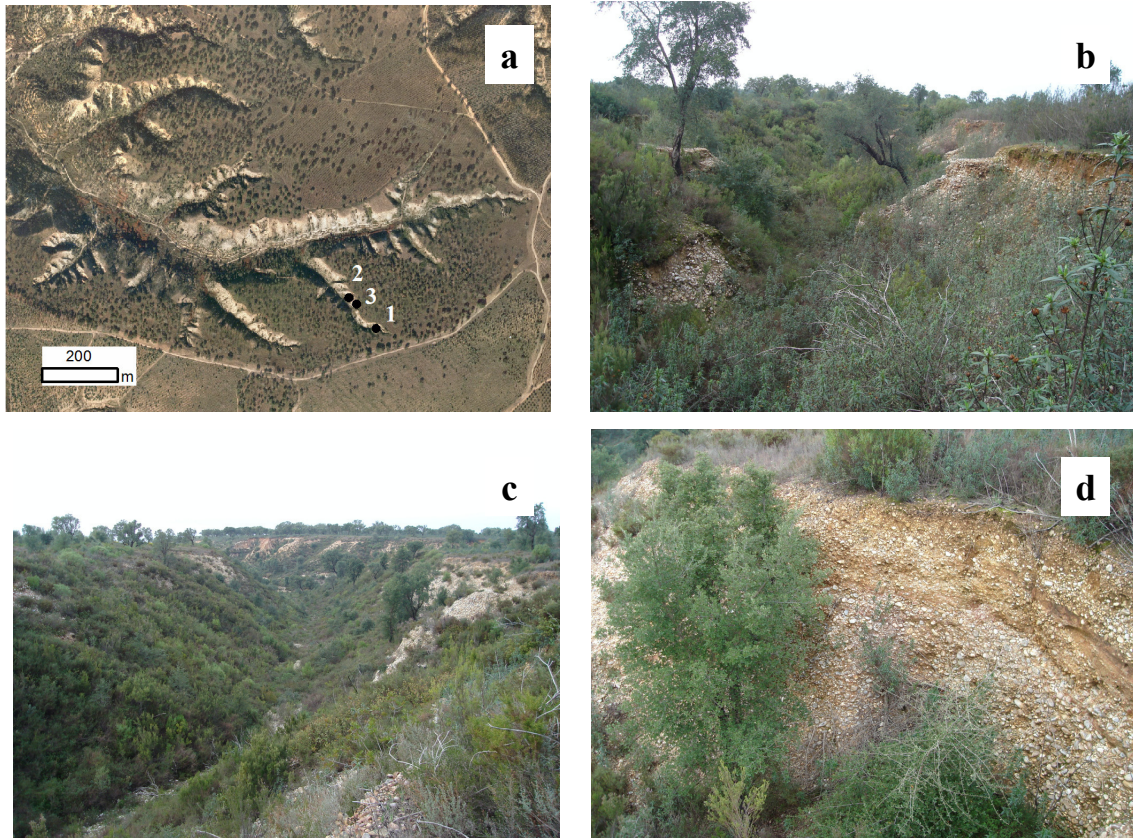


Figura 27 – Exemplo de um PGR de tipo C: (a) perspectiva geral na ortofoto (freguesia de Ulme, Chamusca); (b) Vista a partir de uma das cabeceiras do sistema de ravinas, assinalada com o ponto 1 em (a); (c) Vista para jusante a partir do ponto 2 em (a). Notar os complexos de ravinas à distância entalhando a superfície culminante; (d) exemplo de uma cabeceira declivosa e sem vegetação sobre conglomerados da mesma superfície (ponto 3 em (a)). Padrão associado ao nº 6 no mapa do Anexo 1.

Ao contrário de A, B e C, os PGR D e E têm como denominador comum o facto de não estarem necessariamente relacionados com a superfície culminante da área de estudo, já que as formas que neles ocorrem se situam nas vertentes resultantes do recuo desta superfície com a evolução da rede de drenagem. A diferença fundamental entre D e E prende-se com a organização das formas presentes. O PGR D (Figura 28) é marcado pela presença de ravinas Muito Grandes drenando para fundos de vale aplanados, e actualmente desconectadas total ou parcialmente da rede de drenagem. Estas formas apresentam-se inactivas, e tanto ocorrem em redes como de forma isolada, o que parece traduzir apenas o grau de desenvolvimento de diferentes troços de uma rede de drenagem anterior, isolados pela agradação dos canais de ordem mais elevada (percursos dos actuais fundos de vale aplanados). Na grande maioria destes padrões, ocorrem complexos de ravinas em associação com a rede de drenagem, com sinais de alguma actividade (Figura 28-d).

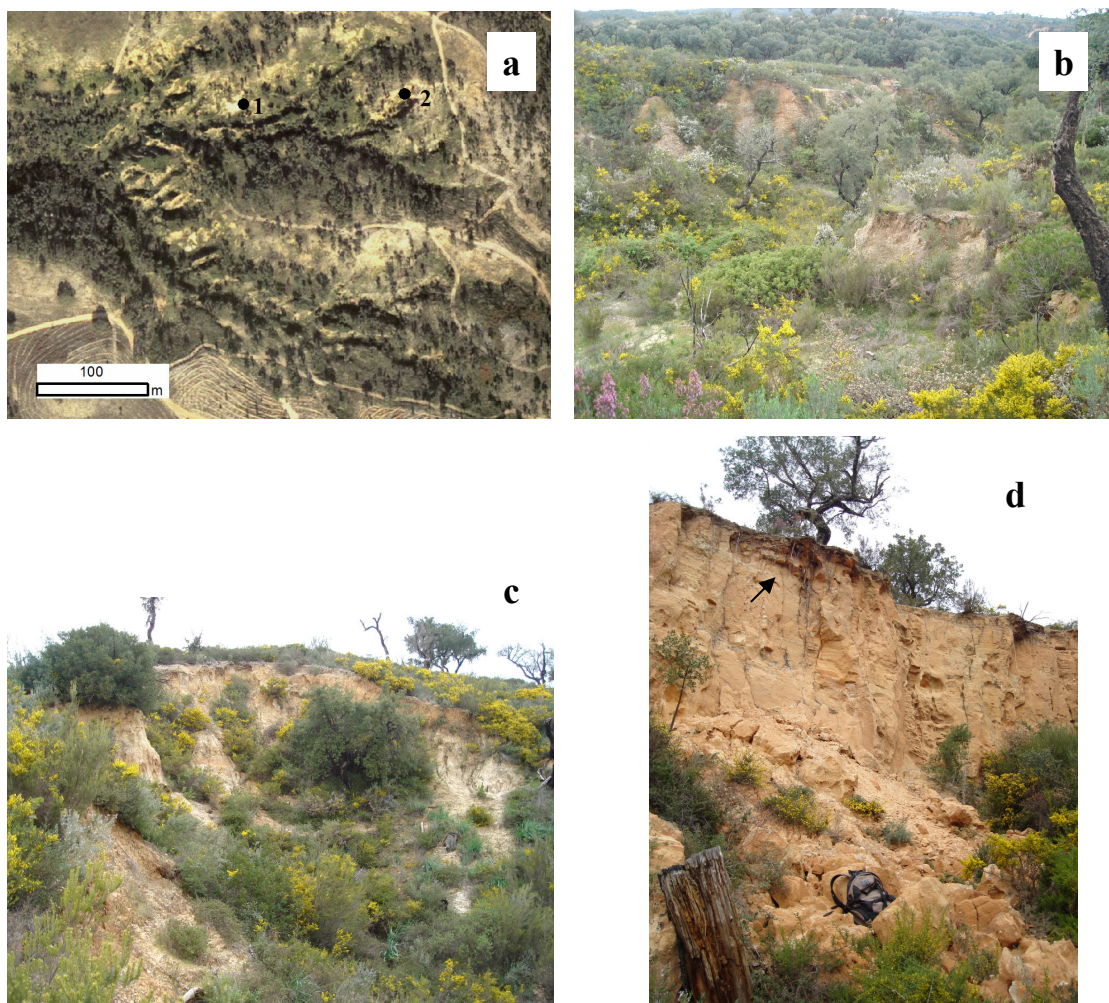


Figura 28 – Exemplo de PGR D: (a) perspectiva geral na ortofoto (freguesia de Pinheiro Grande, Chamusca). Notar as grandes ravinas em rede associadas a complexos; (b) vista do interior do canal (para sul) a partir do ponto 1 em (a); (c) cabeceira em estabilização de um complexo de ravinas na localização do mesmo ponto; (d) depósito recente de material, resultante do recuo de uma cabeceira activa no complexo indicado pelo ponto 2 em (a). Notar o carácter vertical da parede e a árvore jovem parcialmente desenraizada. Padrão associado ao nº 23 no mapa do Anexo 1.

O PGR E difere do D na medida em que é dominado por complexos de ravinas, por oposição a formas simples. Estes complexos ocorrem ao longo de depressões topográficas, e podem estar inteiramente desassociados da superfície culminante (Figura 29) ou terem as suas cabeceiras por ela limitadas (Figura 30).

Os complexos apresentam-se parcialmente activos, e possuem tipicamente muitas dezenas de metros de extensão longitudinal, com alguns exemplares excedendo um hectare de área. Tal como as ravinas associadas ao PGR D, encontram-se total ou parcialmente desconectados da rede de drenagem actual.

Embora se tenha optado por individualizar o padrão E face a D com base na importância dos complexos, são frequentes sectores lineares e relativamente entalhados nas depressões em torno das quais estes actualmente se desenvolvem. Estes sectores evidenciam antigos canais hoje estabilizados, mas cuja evolução passada poderá ter sido um factor crítico no surgimento dos complexos de ravinas. Exemplos são os canais que drenam para W os complexos de ravinas na Figura 29-a, e os dois padrões na Figura 31, evidenciando as associações entre entalhe fluvial e ravinamento, e entre formas simples e em complexos. Padrões associados aos dois tipos foram definidos na rib^a de Ulme e tributários (e.g. Vale do Crespo, Vale do Pai Poldro), bem como a norte da sua desembocadura, até à localidade da Carregueira.

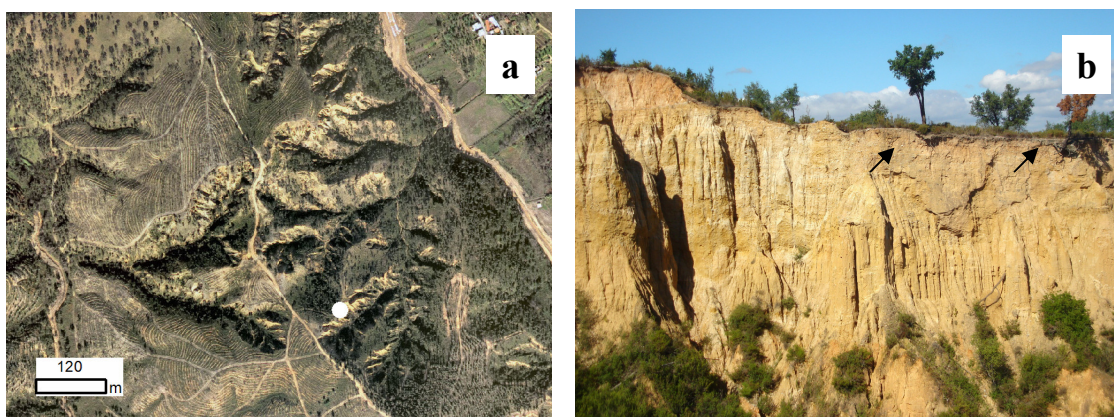


Figura 29 – Exemplo de PGR E apresentando formas desassociadas da superfície culminante: (a) perspectiva geral na ortofoto (freguesia de Pinheiro Grande, Chamusca); (b) parede vertical, correspondente ao ponto em (a). Notar árvores jovens parcialmente desenraizadas pelo recuo da parede. Padrão n^o 21 no mapa do Anexo 1.



Figura 30 – Exemplo de PGR E apresentando formas limitadas a montante pela superfície culminante: (a) perspectiva geral na ortofoto (freguesia de Ulme, Chamusca). Complexos ocorrem em depressões topográficas resultantes do entalhe, alargamento e estabilização dos tributários de um canal principal (fundo de vale de direcção SE-NW); (b) cabeceira assinalada pelo ponto em (a). Padrão n^o 3 no mapa do Anexo 1.

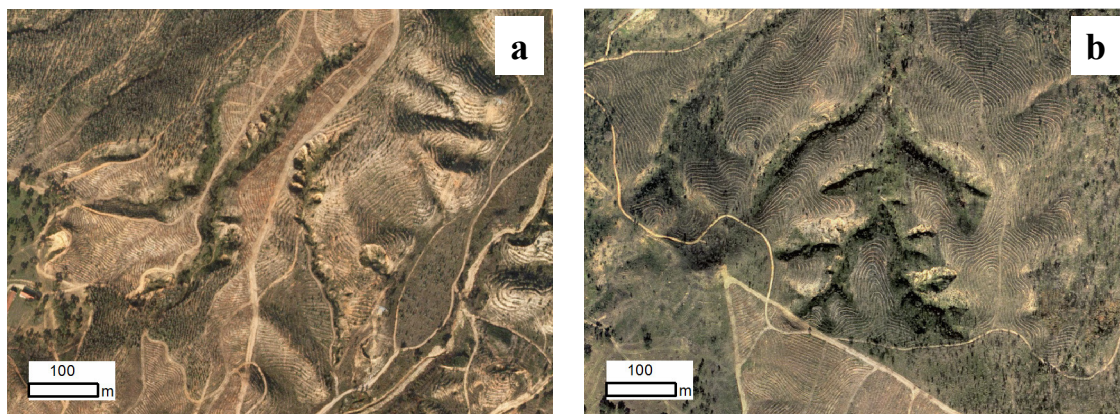


Figura 31 – Relações entre entalhe fluvial e ravinamento, e entre formas simples e em complexos, inerentes aos PGR D e E. As grandes ravinhas inactivas em (a) apresentam complexos parcialmente activos nas paredes, num PGR D. Em (b), uma rede de depressões topográficas, correspondendo claramente a um antigo sistema de canais estabilizados, apresenta hoje complexos de ravinhas em evolução, num PGR E. Ambos os padrões, correspondendo aos números 17 e 29 no mapa do Anexo 1, ocorrem sobre as vertentes originadas pelo recuo da superfície culminante, nas freguesias de Ulme e da Chamusca (município da Chamusca).

Por oposição aos PGR até aqui descritos, os padrões F e G estão associados a formas relativamente superficiais, com dimensões da ordem das dezenas a centenas de m de comprimento e larguras e profundidades decimétricas a métricas. Em ambos, a distribuição das formas é sobretudo controlada pela topografia, ocorrendo estas mais frequentemente como canais incipientes (Figura 32). Todos se localizam em áreas de relevo relativamente suave, ao longo dos vales da rib^a de Muge e tributárias (ribeiras da Calha do Grou, da Lamarosa, do Rosmaninhal e da Almofada), bem como ao longo das ribeiras da Erra e de Sor. As ravinhas encontram-se total ou parcialmente activas e apresentam cabeceiras declivosas com sectores bem entalhados imediatamente a jusante, evoluindo para canais relativamente estreitos, e por vezes desaparecendo na forma de depósitos, bem evidenciados nas ortofotos pelo contraste entre as tonalidades da areia depositada e da vegetação subjacente. O carácter abrupto das cabeceiras, frequentemente sem qualquer entalhe a montante, sugere um controlo importante por parte dos movimentos de massa, ao depositarem no fundo dos canais material facilmente mobilizável por episódios posteriores de escoamento e, quando tendo lugar lateralmente, promovendo a bifurcação dos canais.

O PGR F distingue-se de G pela presença de algumas formas muito entalhadas (mais de 1,5 m; Figura 33), que o segundo não apresenta. Não são claros os factores que controlam directamente a existência destas formas. Causas possíveis poderiam ser de carácter natural (e.g. factores pedológicos, limiares topográficos para o escoamento erosivo) ou antrópico (e.g.

pisoteio sistemático pelo gado, negligência das formas por parte dos proprietários²⁴, mobilização do solo em anos de episódios chuvosos particularmente intensos). A sua identificação é complicada pelo facto de estes factores poderem não ser actualmente observáveis no terreno, tendo exercido a sua influência no passado (e.g. ocupação do solo). Exemplos observados de acção antrópica, embora com o fim de estabilizar ravinas existentes, são mostrados na Figura 34.

De acordo com os objectivos definidos para esta parte do trabalho, optou-se apenas por acentuar a existência de formas particularmente entalhadas ao distinguir os PGR F e G. No entanto, as analogias entre ambos são claras, pelo que deverão ser conjuntamente considerados em futuros estudos de pormenor.

Por último, foi necessário definir um padrão adicional (PGR H) para enquadrar a especificidade das formas observadas em uma única área. Trata-se de formas de grandes dimensões (várias centenas de m de comprimento e cerca de 1 a 2 m de largura) apresentando uma ramificação incipiente (Figura 35). Estão desenvolvidas sobre material arenoso, ao longo de depressões topográficas, e são relativamente superficiais (cerca de 1 m de profundidade). São mais desenvolvidas em profundidade, comprimento e largura do que as formas incipientes em G e F, e menos do que as formas mais entalhadas em F, sendo muito menos desenvolvidas do que as grandes ravinas associadas aos PGR A a D. Ocorrem numa área de relevo relativamente suave, na rib^a do Rosmaninhal (tributária da rib^a de Muge), e estão em parte estabilizadas. A sua origem poderá estar relacionada com a topografia local (já que ocorrem num troço da vertente particularmente regular, como é visível pela organização paralela dos canais) ou com o uso do solo no passado (e.g. mobilização do solo ao longo de anos de precipitações intensas).

²⁴ Poesen (1993; cit. por Nachtergaele *et al.*(2002a: 224) refere três possíveis motivos para que uma ravina incipiente atinja grandes dimensões: (i) a forma origina-se em terreno que não é lavrado; (ii) cresce demasiado antes da primeira lavra para poder ser eliminada com o material disponível; (iii) forma-se sistematicamente no mesmo local e o proprietário suspende os esforços para a eliminar.



Figura 32 – Exemplos de formas incipientes controladas pela topografia: (a) PGR n° 49, freguesia da Erra, Coruche; (b) PGR n° 47, freguesia do Chouto, Chamusca; (c) PGR n° 46, freguesia de Foros de Arrão, Ponte de Sor; (d) PGR n° 50, freguesia do Couço, Coruche. Numeração corresponde à do mapa no Anexo 1.

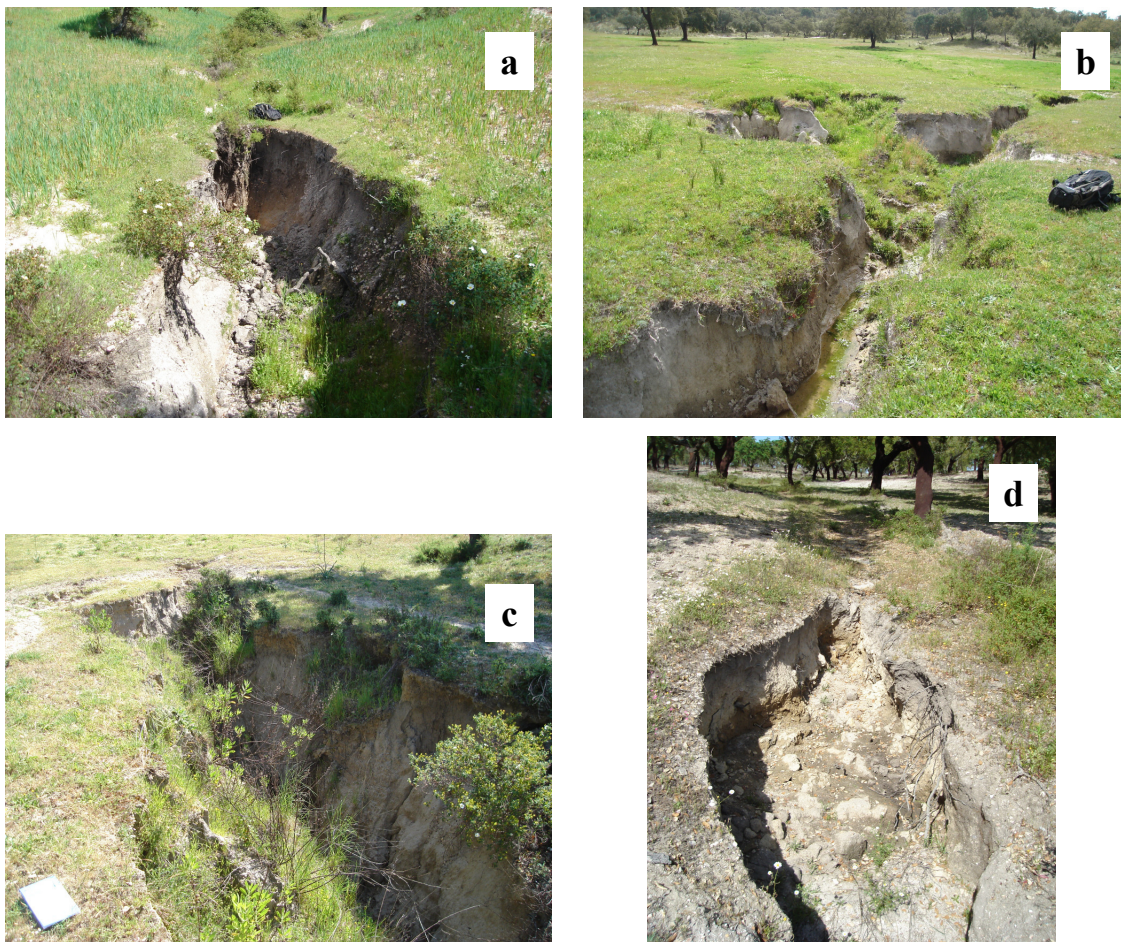


Figura 33 – Exemplos de formas entalhadas. Todas são controladas pela topografia, correspondendo aos locais de maior acumulação de escoamento. (a) PGR nº 47, freguesia do Chouto, Chamusca; (b) PGR nº 51, freguesia de Raposa, Almeirim. Objecto na cabeceira em (a) é a mesma mochila que em (b); (c) PGR nº 49, freguesia da Erra, Coruche (objecto é uma folha dobrada da carta militar); (d) PGR nº 50, freguesia do Couço, Coruche. Numeração corresponde à do mapa no Anexo 1.



Figura 34 – Dois exemplos de influências da acção antrópica sobre o ravinamento: (a) deposição de resíduos florestais a fim de promover a estabilização das ravinas, aqui na freguesia da Tramaga (Ponte de Sor), frequentemente observada no campo; (b) ponto de passagem de gado através de uma ravina na freguesia da Erra (Coruche). Notar a barreira de madeira colocada a fim de cobrir o entalhe, já bem abaixo do nível original da vedação (correspondente à vara de cor clara). A jusante (para a direita), a ravina torna-se mais profunda e estreita.

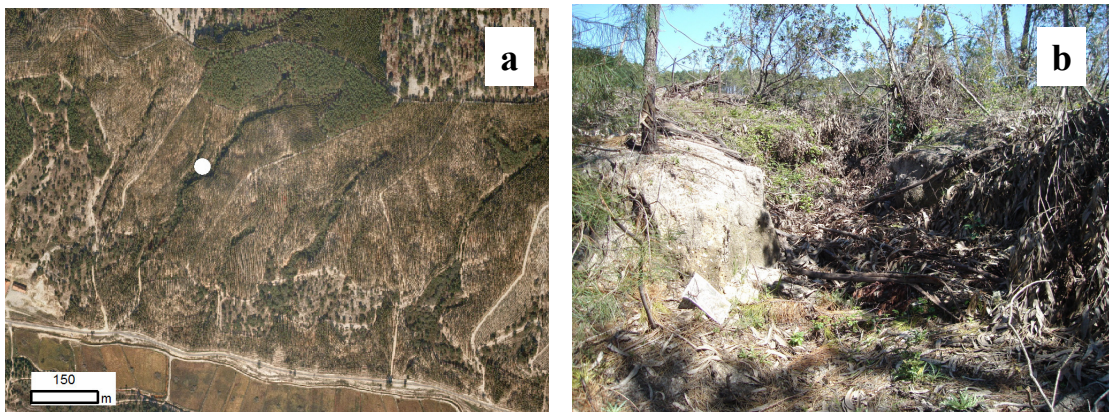


Figura 35 – O único exemplo encontrado de PGR H: (a) perspectiva geral na ortofoto (freguesia do Chouto, Chamusca); (b) interior do canal, na confluência identificada pelo ponto em (a). O canal encontra-se em grande parte coberto por folhagem e ramos devido ao corte recente do eucaliptal envolvente. À esquerda, é visível o interflúvio arenoso que separa os dois canais confluentes. O objecto no chão é uma folha A4. PGR correspondente ao nº 7 no mapa do Anexo 1.

3.2. Relações entre formas individuais e factores de controlo

Após a definição dos Padrões Gerais de Ravinamento, procurou-se averiguar até que ponto as suas formas constituintes podem ser diferenciadas com base nas quatro variáveis inicialmente utilizadas para dividir a área de estudo. Embora estas variáveis tenham sido seleccionadas pelo seu potencial controlo sobre o surgimento e desenvolvimento de ravinas, sustentado no

enquadramento teórico que constituiu objecto do Capítulo I, a variabilidade dimensional observada tornou claro que apenas as formas mais superficiais podem possivelmente ter alguma relação com todas elas. Em todos os outros casos, os canais apresentam profundidades que excedem largamente a espessura do *solum* (inviabilizando qualquer controlo significativo por parte do tipo de solo) e dimensões com expressão na topografia de escala 1:25000 que serviu de base ao cálculo dos dois índices topográficos utilizados (Índice de Potência do Escoamento e Índice Topográfico de Encharcamento). Nestes casos, são os valores dos índices a serem condicionados pela existência das formas, e não o oposto.

Optou-se assim por analisar as relações entre as formas de grandes dimensões nos PGR A a E e a litologia, e as dos restantes padrões (F, G e H) com as quatro variáveis originais. Dado o menor grau de desenvolvimento destas formas, optou-se também por analisá-las quanto à ocupação do solo, extraída da cartografia CORINE Land Cover de 2006²⁵. Embora não seja possível assumir que a actual ocupação tenha sido um factor na sua formação, procurou-se saber até que ponto as associações entre classes de ocupação e a presença de entalhes sugerem possíveis controlos.

Dada a maior escala desta análise, centrada em formas específicas por oposição a toda a área de estudo, optou-se por utilizar informação com um grau de detalhe superior à anteriormente adoptada. No caso da litologia, foi utilizada a Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50000, por oposição à cartografia 1:500000 anteriormente utilizada. A utilização desta escala maior foi inicialmente inviabilizada pela necessidade implícita de vectorizar a informação equivalente à totalidade da área de estudo, disponível apenas em formato impresso. No presente caso, em que apenas a área correspondente às formas em análise exigiu vectorização, procedeu-se à digitalização das sete folhas que cobrem a área de estudo, com uma célula de aproximadamente 63,5 μm , ou 157,5 células/cm. Toda a informação foi depois georreferenciada, tendo sido obtidos valores de erro médio quadrático (*root mean square error*, RMSE) sempre inferiores a 5 m (Tabela 20).

²⁵ A ocupação do solo foi considerado na descrição geral da área de estudo efectuada em II.1. É caracterizado na Tabela 2 e na Figura 9.

Tabela 20 - Características da georreferenciação das folhas da Carta Geológica de Portugal 1:50000.

Folha	Nº de pontos de controlo	Transformação utilizada (grau do polinómio)	RMSE (m)
27-D (Abrantes)	4	1ºgrau	2,5
28-C (Gavião)	4	1ºgrau	1,1
31-A (Santarém)	7	2ºgrau	2,5
31-B (Chouto)	7	2ºgrau	2,9
31-C (Coruche)	4	1ºgrau	3,3
31-D (Montargil)	4	1ºgrau	4,9
32-A (Ponte de Sôr)	4	1ºgrau	3,3

No caso dos solos, a informação foi utilizada ao nível de classificação da família, o segundo mais detalhado do sistema de classificação do SROA, por oposição ao nível mais geral da Ordem, anteriormente utilizado (vd. II.2.3)²⁶.

Os diferentes PGR foram depois analisados nas ortofotos, tendo sido seleccionado um conjunto de formas a partir de cada um. Seleccionaram-se canais simples, tidos como os constituintes mais elementares de qualquer padrão, mesmo quando integrados em redes. Naqueles casos em que os canais se apresentaram associados a complexos de ravinas (PGR C e D), consideraram-se ambos em conjunto, dado que a distribuição sistemática dos segundos ao longo das paredes dos primeiros não permitiria uma análise separada.

No caso dos complexos (PGR E), e dada a impossibilidade de distinguir canais individuais imposta pela escala das ortofotos, optou-se por considerar todo o sistema. Esta opção é adicionalmente justificada pelo facto de os complexos constituírem áreas contínuas de degradação, por oposição às redes, em que os vários canais são separados por uma superfície topográfica não degradada. Procurou-se seleccionar 20 formas para cada PGR, mas nem sempre foi possível fazê-lo dada a pequena frequência de certos padrões: foi este o caso do PGR B (12 formas seleccionadas a partir de 3 áreas de ocorrência) e H (5 formas a partir de uma única área). As formas de maiores dimensões (A-E) foram delimitadas através de polígonos, e as mais incipientes (F, G e H) com recurso a linhas definidas ao longo dos canais, definindo-se assim um total de 137 formas.

É importante salientar que na ausência de um levantamento rigoroso de campo (i.e. levantando os limites das formas com GPS ou uma estação total e usando uma fonte de maior escala ou observação directa para quantificar a extensão de afloramento das diferentes

²⁶ A Carta Complementar inclui ainda as fases associadas a cada família, não utilizadas de forma a reduzir a quantidade de classes em análise. O nível de classificação mais detalhado é o da Série (Carvalho Cardoso, 1974). No entanto, este não foi considerado na Carta Complementar de Solos de Portugal à escala 1: 25000, a informação de maior escala disponível.

litologias), os resultados desta análise têm apenas um valor indicativo, pretendendo representar relações gerais.

3.2.1. Padrões Gerais de Ravinamento A-E

Dada a extensão em análise, foi necessário fazer corresponder as diferentes designações atribuídas às formações nas folhas da Carta Geológica de Portugal abrangidas. A Tabela 21 relaciona as formações em termos crono-estratigráficos, incluindo aquelas utilizadas na cartografia 1: 500000 já descrita. Não foram representadas as aluviões (Holocénico) e os depósitos de terraços (Plistocénico), cujas idades são equivalentes em todas as folhas utilizadas.

Face à variabilidade nas denominações para as duas principais formações, referentes ao Mio-pliocénico e ao Pliocénico, adoptaram-se duas designações gerais. Utilizou-se “Conglomerados”, para referir as formações pliocénicas a plio-plistocénicas relativamente grosseiras que definem a superfície culminante da área de estudo. Estas correspondem aos "Conglomerados da Serra de Almeirim" na cartografia geológica 1:500000 (propostos por Barbosa (1995; cit. por Ferreira, 2004: 118). A denominação “Formação Argilo-Arenítica” foi utilizada para corresponder às formações Mio-Pliocénicas de textura mais fina que lhes subjazem, com paralelo nos "Arenitos de Ulme" e nas "Argilas de Tomar" de Barbosa (1995). É de referir que, segundo este autor, os Conglomerados da Serra de Almeirim e os Arenitos de Ulme constituem fácies distais de uma mesma formação Pliocénica (Aloformação de Almeirim) (Ferreira, 2005: 118; Martins, 2004: 51).

Tabela 21 - Correspondência entre as formações nas folhas da Carta Geológica de Portugal 1: 50000 e 1:500000. Linhas a tracejado indicam associação considerada provável (e.g. na folha 31-B, a formação P3 é considerada do Pliocénico Superior, mas é sugerido que possa estender-se ao Vilafranquiano).

		Autores			
		Gonçalves <i>et al.</i> (1979) (Folha 27-D, Abrantes)	Zbyszewski <i>et al.</i> (1981) (Folha 28-C, Gavião)	Zbyszewski (1953) (Folha 31-A, Santarém)	Zbyszewski e Veiga Ferreira (1979) (Folha 31-B, Chouto)
Idade	Holocénico	As-Areias superficiais de vales e de terraços		As-Areias superficiais de vales e terraços ²⁷	As-Areias superficiais de vales e de terraços
	Plistocénico				
	Vilafranquiano		P-Pliocénico e Vilafranquiano: arenitos argilosos, areias e cascalheiras de planalto MP-Miocénico Superior e Pliocénico indiferenciados: areias, argilas, arenitos, com níveis de cascalheiras		
	Pliocénico Superior	P-Arenitos e Conglomerados		P ³ -Grés e conglomerados da Serra de Almeirim. MP-Complexo Argilo-gresoso das fazendas de Almeirim.	P ³ -Grés e Conglomerados da Serra de Almeirim
	Pliocénico				MP-Complexo Argilo-Gresoso da Pernançha, Vale de Carros e Fazendas de Almeirim
	Miocénico Sup.	MP - Formação argilo-arenítica dos vales de Ulme, Bemposta, etc.			
Miocénico					
		Autores			
		Zbyszewski e Veiga Ferreira (1968) (Folha 31-C, Coruche)	Zbyszewski e Carvalhosa (1984) (Folha 31-D, Montargil)	Carvalho e Carvalhosa (1982) (Folha 32-A, Ponte de Sor)	Barbosa (1995)
Idade	Holocénico	As-Areias superficiais de vales e de terraços			
	Plistocénico				
	Vilafranquiano				
	Pliocénico Superior	P3-Grés e Conglomerados da Serra de Almeirim, cascalheiras dos planaltos	P3-Pliocénico (Grés e Conglomerados dos Planaltos)	P3-Plio-Plistocénico (Cascalheiras e Areias) MP-Miocénico e Pliocénico indiferenciados (arenitos, argilas e conglomerados).	Conglomerados da Serra de Almeirim Arenitos de Ulme
	Pliocénico				
	Miocénico Sup.	MP-Complexo argilo-gresoso de Coruche	MP-Miocénico e Pliocénico indiferenciados (Complexo Argilo-Gresoso de Coruche)		
Miocénico				Argilas de Tomar	

Em ordem a aferir a existência de relações, os temas cartográficos das formas foram sobrepostos à carta geológica²⁸. Os resultados, na forma de percentagem de área ocupada pelas diferentes litologias em cada forma individual, são apresentados na Figura 36. Os valores médios e de desvio-padrão para as formas em cada Padrão Geral de Ravinamento são apresentados na Tabela 22.

A análise da Figura 36 e da Tabela 22 deixa claro o predomínio da Formação Argilo-arenítica, muito especialmente nos PGR D e E. Torna, ao mesmo tempo, evidente a importância

²⁷ O autor integra esta formação nos “Terrenos modernos e pleistocénicos indiferenciados”, considerando a sua idade como estendendo-se “do período das glaciações quaternárias até aos tempos modernos” (Zbyszewski, 1953: 6)

²⁸ Foi utilizada a ferramenta *Intersect* do ArcGIS 9.1. As tabelas resultantes foram exportadas para o Microsoft Excel, sendo as posteriores análises realizadas sobre os valores de área para cada polígono. As formas dos PGR A a E enquadram-se nas folhas 27-D (Abrantes), 28-C (Gavião) e 31-B (Chouto).

residual que têm as formações aluvionares e os depósitos de terraços para os vários PGR associados a formas de grandes dimensões.

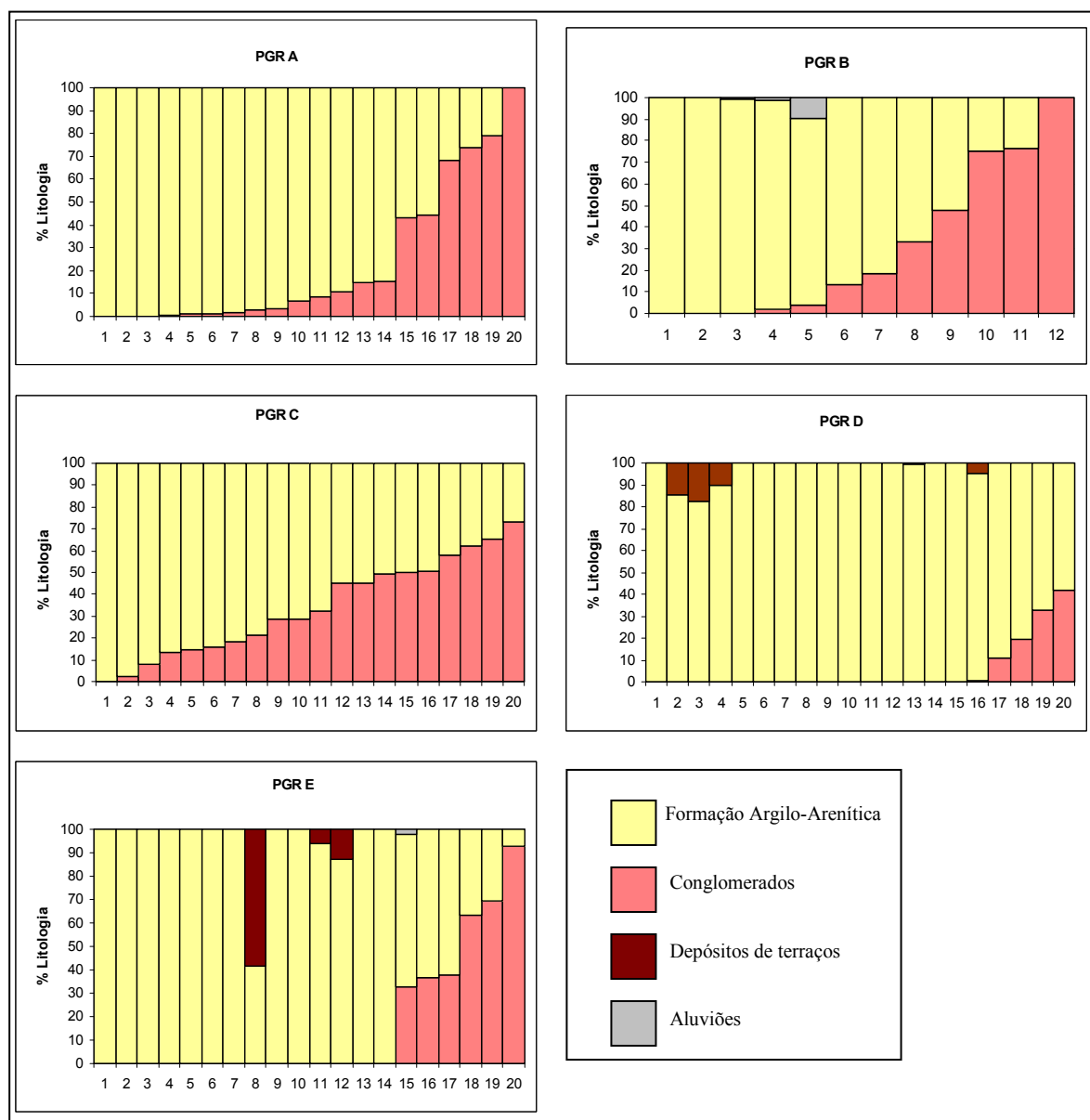


Figura 36 – Percentagens de área ocupada por cada tipo de litologia em cada uma das formas individuais associadas aos PGR A e E. Para facilitar a leitura das relações entre as principais litologias, as formas foram organizadas por ordem crescente de incidência da formação “Conglomerados”.

A articulação das características anteriormente definidas para os vários PGR com a Tabela 22 sugere claramente contextos litológicos distintos. Os PGR B e C têm os seus limites laterais e montante bem marcados e definidos pela superfície dos Conglomerados (vd. Figs. 26 e 27). Os PGR D e E, por oposição, apresentam formas que evoluem quase totalmente sobre as vertentes resultantes do recuo da superfície culminante (Figs. 28 e 29). No caso específico do

PGR E, associado a grandes complexos de ravinas, as formas evoluem sobre a Formação Argilo-Arenítica mas têm frequentemente os sectores de cabeceira limitados pelos conglomerados, resultando num aumento relativo da importância desta litologia (16,6%) face a D (5,3%).

Tabela 22 - Percentagens de área associadas às diferentes litologias nas formas dos PGR A a E (N é o nº de formas individuais consideradas para cada PGR; DP é o desvio-padrão).

PGR	N	Conglomerados		Formação Argilo-Arenítica		Terraços		Aluviões	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
A	20	23,7	32,1	76,3	32,1	...	...	...	...
B	12	30,8	35,6	68,3	35,0	...	...	0,94	2,8
C	20	34,2	22,1	65,9	22,1	...	...	...	...
D	20	5,3	12,0	92,4	12,0	2,4	5,3	0,03	0,15
E	20	16,6	28,7	79,4	29,5	3,9	13,1	0,11	0,50

O PGR A parece ocupar uma posição intermédia, com as percentagens de área associada às duas formações entre os valores de B e C, por um lado, e D e E por outro.

A importância residual das formações aluvionares confirma a associação do ravinamento às vertentes, por oposição aos fundos de vale. Ao mesmo tempo, a reduzida importância dos depósitos de terraços é indicativa de duas possíveis situações: (1) as formas ocorrem em áreas onde não existem terraços, e (2) as formas entalham os terraços, evoluindo actualmente sobre os materiais subjacentes. Ambas as situações se verificam, sendo apresentados na Figura 37 exemplos da segunda situação.

A Figura 37 também ilustra a inexactidão por vezes associada à sobreposição das formas foto-interpretadas às folhas da Carta Geológica. Esta situação, que poderá ter origem na própria base topográfica utilizada (carta corográfica 1:50000²⁹), resultou em certos casos em pequenos desvios das manchas das diferentes formações em relação às formas, originando erros quando ocorrem transições litológicas. Em vários casos, estes desvios resultaram num exagero da área ocupada por terraços, já que é evidente que a posição real das formas é ao longo da rede de drenagem face à qual os terraços ocupam posições de interflúvio, e não parcialmente sobre estes (exemplos assinalados com setas na Figura 37). Estes erros, embora dignos de referência, não alteraram a importância residual que estes depósitos têm na área ocupada por ravinas. A posição correcta das duas formas assinaladas face à rede de drenagem é apresentada em relação à topografia 1:25000 na Figura 38, evidenciando o desajustamento face à carta geológica.

²⁹ Referida nas notícias da carta 27-D (Gonçalves *et al.*, 1979: 13) e 28-C (Zbyszewski *et al.*, 1981: 4).

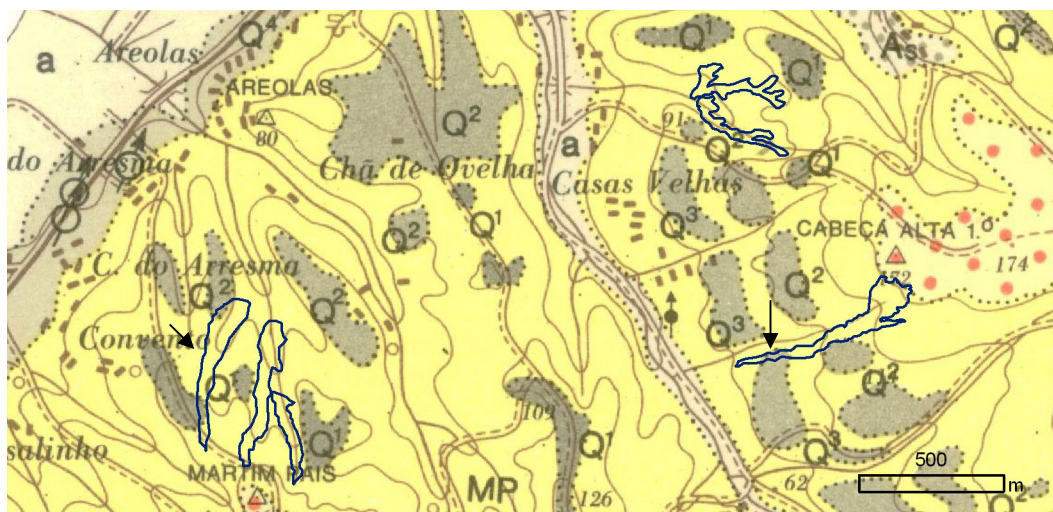


Figura 37 - Formas desenvolvidas ao longo da rede de drenagem, entalhando terraços (Q₁, Q₂ e Q₃), sobre a Carta Geológica de Portugal 1:50000 (Folha 27D-Abrantes). As setas assinalam situações em que a geologia se apresenta desajustada face à topografia real. Freguesia do Pinheiro Grande, Chamusca.

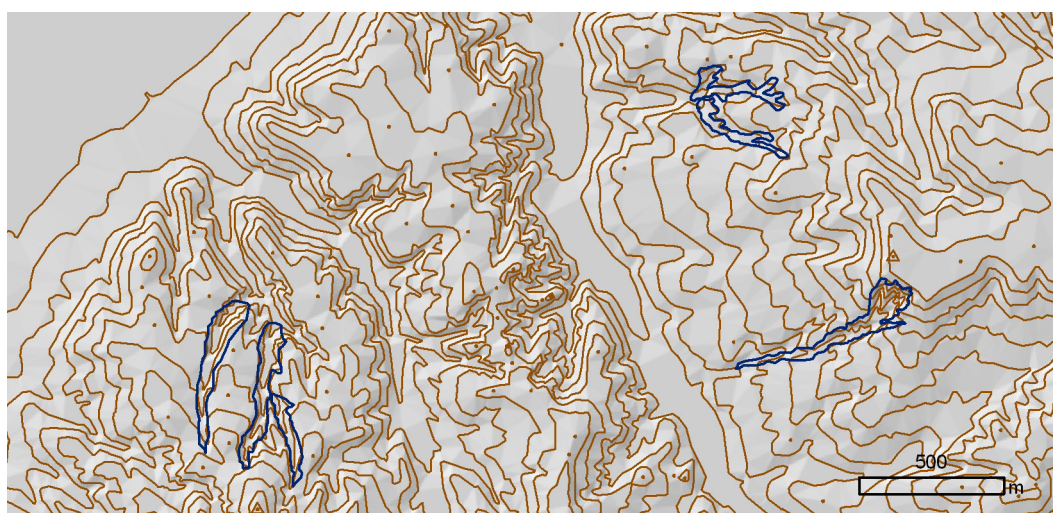


Figura 38 - As mesmas formas da Figura 37, sobrepostas à topografia 1:25000 e a um relevo de sombras (*Hillshade*). Notar o ajustamento face à rede de drenagem.

Por último, procurou-se aferir até que ponto as percentagens de área abrangida por cada uma das duas formações nas formas individuais seleccionadas permitem diferenciar estatisticamente os vários PGR. De forma a justificar a opção por um teste paramétrico ou não paramétrico, testou-se a normalidade da distribuição dos valores de cada uma das amostras usando o teste de Kolmogorov-Smirnov, escolhido por se ajustar a variáveis contínuas (Burt e Barber, 1996: 360)³⁰. O teste compara funções de distribuição de probabilidades acumuladas,

³⁰ Foi utilizado o *software* Statistica 6.0.

associadas aos valores da amostra em análise, ou $S(x)$, e a uma distribuição normal assumida com base nos valores da amostra, $F(x)$. A estatística de teste D consiste no valor mais elevado entre os módulos das diferenças entre valores observados (amostra) e esperados (distribuição normal), ou:

$$D = \max |S(x) - F(x)|$$

Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para as percentagens de área associada a cada uma das duas litologias predominantes nas formas extraídas de cada PGR. D é o valor da estatística usada para testar a assunção de normalidade. α é a margem de erro implicada na rejeição da hipótese nula. Foram considerados significativos (a negrito) valores iguais ou inferiores a 0,05. C - Conglomerados; FAA - Formação Argilo-Arenítica.

PGR	n	Variável	D	α
A	20	C	0,305	<0,05
		FAA	0,305	<0,05
B	12	C	0,219	>0,20
		FAA	0,232	>0,20
C	20	C	0,141	>0,20
		FAA	0,141	>0,20
D	20	C	0,444	<0,01
		FAA	0,319	<0,02
E	20	C	0,418	<0,01
		FAA	0,308	<0,05

Os resultados do teste permitem rejeitar a hipótese nula (i.e. as amostras provêm de populações normalmente distribuídas) com margens de erro (α) inferiores a 0,05 para os PGR A, D e E, mas apenas com margens superiores a 0,20 no caso dos PGR B e C, indicando que estes dois se aproximam de uma distribuição normal.

Em função da existência de diferentes distribuições, optou-se por recorrer a um teste não paramétrico para testar a existência de diferenças entre as várias amostras, tendo-se optado pelo de Kolmogorov-Smirnov. Este teste apresenta a vantagem de ser sensível à forma das distribuições (Hill e Lewicky, 2006: 388). Os resultados são apresentados na tabela 24.

A hipótese de igualdade não pode ser rejeitada entre, respectivamente, A e B, e B e C. No entanto, A e C são significativamente diferentes. Ao mesmo tempo, as diferenças entre C e os PGR D e E são altamente significativas. Estas diferenças, juntamente com a igualdade entre D e E e o facto de estes dois padrões diferirem significativamente (por vezes muito significativamente) de todos os outros em termos de proporção de conglomerados (embora não de arenitos), confirmam as semelhanças nos contextos de ocorrência de D e E, em associação às vertentes resultantes do recuo das formações mais grosseiras da superfície culminante.

Tabela 24 - Resultados da comparação entre os conjuntos de formas dos diferentes PGR utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov, expressos como margens de erro associadas à rejeição da hipótese nula (i.e. amostras provêm da mesma população). Foram considerados significativos valores <0,05, acentuados a negrito. C - Conglomerados; FAA –Formação Argilo-Arenítica.

PGR	A		B		C		D		E	
	CA	FAA	CA	FAA	CA	FAA	CA	FAA	CA	FAA
A			>0,10	>0,10	<0,05	<0,05	<0,005	<0,10	<0,005	<0,10
B					>0,10	>0,10	<0,025	>0,10	<0,05	>0,10
C							<0,001	<0,005	<0,001	<0,025
D									>0,10	>0,10
E										

3.2.2. Padrões Gerais de Ravinamento F-H

3.2.2.1. Litologia

Os resultados da sobreposição das formas à Carta Geológica³¹, apresentados na Tabela 25 e na Figura 39, mostram um predomínio absoluto da formação Argilo-Arenítica, semelhante àquele já observado para os PGR D e E, sendo esta seguida pelos Conglomerados (comparar a Figura 39 com a Figura 36 (d) e (e)). A formação Argilo-Arenítica abrange a totalidade das formas do PGR H, pelo que este não foi representado.

À semelhança do que ocorre em D e E, verifica-se uma importância residual para outras classes litológicas, i.e. Aluviões, Depósitos de Terraços e Areias Superficiais de Vales e de Terraços, mesmo com esta última formação abrangendo a totalidade de uma das formas no PGR G (Figura 39 (b)).

Tabela 25 – Distribuição das diferentes litologias nas ravinas dos PGR F, G e H. Valores em percentagem.

PGR	N	Conglomerados		Formação Argilo-Arenítica		Terraços		Aluviões		Areias superficiais de vales e terraços	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
F	20	1,15	5,14	98,57	5,23	...	...	0,28	1,23	...	...
G	20	17,53	32,92	72,62	40,66	2,66	11,90	...	...	7,19	23,94
H	5	...	...	100,00	...	...	...	...	...	...	...

³¹ A correspondência crono-estratigráfica entre as formações descritas no conjunto das folhas utilizadas foi já apresentada na Tabela 21. As formas dos PGR F a G enquadram-se nas folhas 31-A (Santarém), 31-B (Chouto), 31-C (Coruche), 31-D (Montargil), e 32-A (Ponte de Sor).

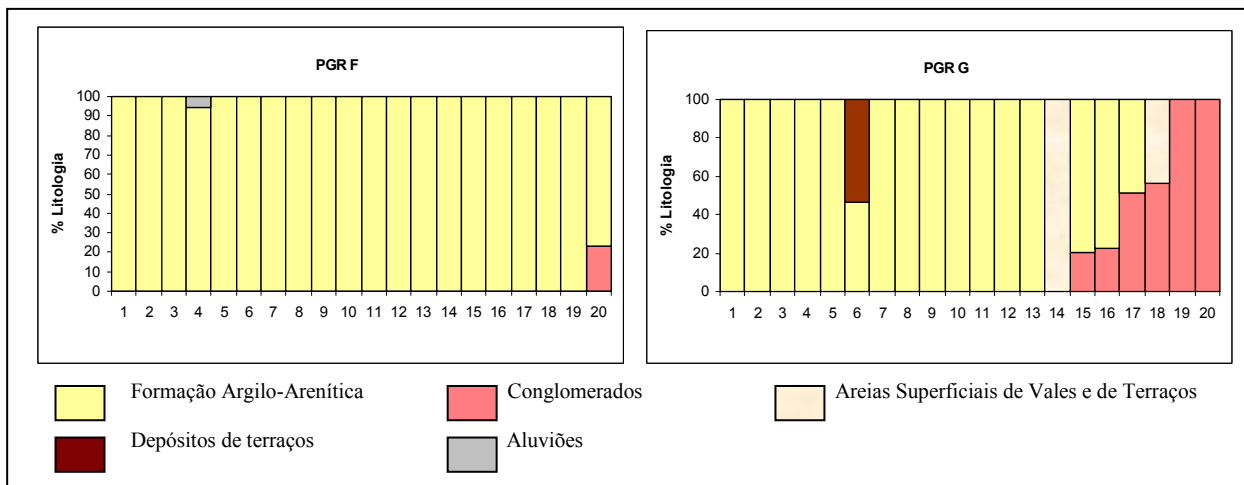


Figura 39 - Percentagens de área ocupada por tipo de litologia em cada uma das formas individuais associadas aos PGR F e G. O PGR H não foi representado, já que as formas ocorrem exclusivamente na Formação Argilo-Arenítica. Formas organizadas por ordem crescente de incidência da formação "Conglomerados".

De forma a testar estatisticamente as diferenças de contexto litológico, adoptou-se o mesmo procedimento já descrito para os PGR A a E. As distribuições de percentagens associadas às duas formações principais foram sujeitas ao teste de Kolmogorov-Smirnov, de forma a aferir o seu ajustamento a uma distribuição normal. O PGR H constituiu uma excepção a este procedimento, já que a ausência de variância (todas as formas estão integradas na Formação Argilo-Arenítica) implica a não-normalidade da distribuição.

Os resultados mostram claramente que nenhuma das distribuições se aproxima da normalidade, sendo mesmo em três de quatro casos possível rejeitar a hipótese de normalidade com uma margem de erro inferior a 0,01 (Tabela 26). Adoptou-se assim novamente o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov em ordem a testar a hipótese de pertença das formas de diferentes PGR a uma mesma população.

Dado que a litologia é a única variável potencialmente relacionada com todos os oito PGR definidos, optou-se por testar a hipótese de igualdade entre todas as possíveis combinações, complementando assim a informação já apresentada na Tabela 24. Os resultados são apresentados na Tabela 27.

A análise da tabela permite constatar que os PGR F, G e H são significativamente diferentes de A, B e C (com uma única excepção no caso das percentagens associadas à Formação Argilo-Arenítica entre G e B), frequentemente com margens de erro inferiores a 0,005. Ao mesmo tempo, a hipótese (nula) de igualdade não pode ser rejeitada para qualquer combinação de PGR de D a H, evidenciando as semelhanças no contexto litológico associado

a estes padrões. Os PGR F, G e H vêm assim juntar-se a D e E numa quase total associação às extensões de argilas e arenitos resultantes do recuo das formações mais grosseiras da superfície culminante.

Tabela 26 - Resultados do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para as formas extraídas dos PGR F e G, com respeito à incidência das duas principais litologias (Conglomerados - C; Formação Argilo-Arenítica - FAA). D é o valor da estatística usada para testar a assunção de normalidade. α é a margem de erro implicada na rejeição da hipótese nula. Foram considerados significativos (a negrito) valores iguais ou inferiores a 0,05.

PGR	n	Variável	D	α
F	20	C	0,53847	<0,01
		FAA	0,50749	<0,01
G	20	C	0,40282	<0,01
		FAA	0,34965	<0,05

Tabela 27 – Resultados da comparação entre os conjuntos de formas de todos os diferentes PGR quanto à incidência das duas principais litologias (Conglomerados - C; Formação Argilo-Arenítica - FAA) utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov. Resultados são expressos como as margens de erro α associadas à rejeição da hipótese nula (i.e. amostras provêm da mesma população). Foram considerados significativos valores de $\alpha < 0,05$, acentuados a negrito.

	A		B		C		D		E		F		G		H	
	C	FAA	C	FAA	C	FAA	C	FAA	C	FAA	C	FAA	C	FAA	C	FAA
A		>0,10	>0,10	>0,10	<0,05	<0,05	<0,005	<0,10	<0,005	<0,10	<0,001	<0,001	<0,005	<0,05	<0,01	<0,01
B					>0,10	>0,10	<0,025	>0,10	<0,05	>0,10	<0,001	<0,001	<0,05	>0,10	<0,025	<0,025
C							<0,001	<0,005	<0,001	<0,025	<0,001	<0,001	<0,001	<0,005	<0,005	<0,005
D									>0,10	>0,10	>0,10	>0,10	>0,10	>0,10	>0,10	>0,10
E											>0,10	<0,10	>0,10	>0,10	>0,10	>0,10
F													>0,10	>0,10	>0,10	>0,10
G															>0,10	>0,10
H																

3.2.2.2. Tipo de solo

As formas associadas aos padrões F, G e H foram sobrepostas à Carta Complementar de Solos de Portugal à escala 1:25000, sendo os resultados apresentados na Figura 40.

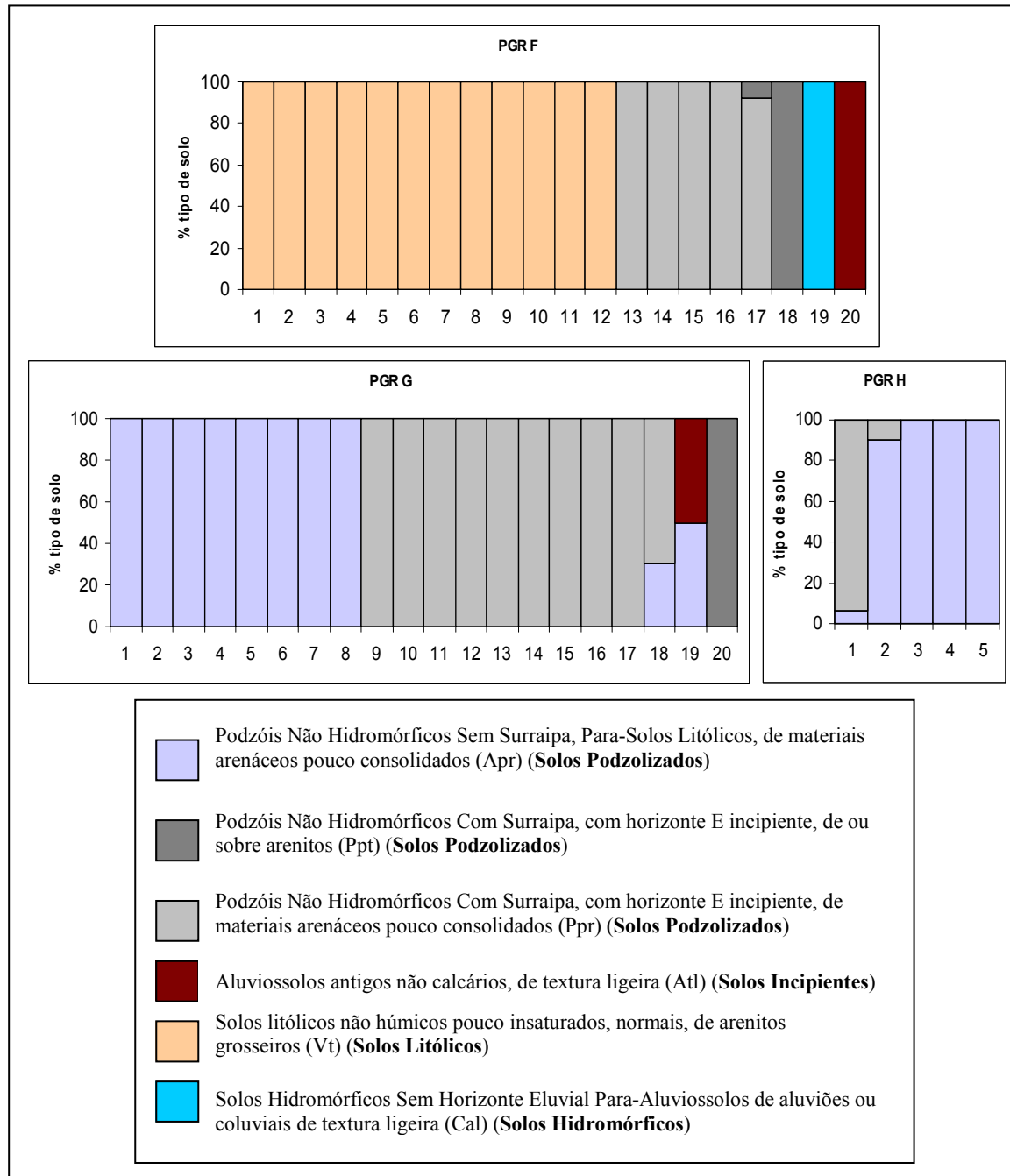


Figura 40 - Percentagens do comprimento de cada forma individual correspondentes a cada tipo de solo (classificado ao nível da família) em cada uma das formas individuais associadas aos PGR F, G e H. A sigla correspondente na Carta Complementar de Solos de Portugal encontra-se entre parênteses. A Ordem, nível hierárquico adoptado na definição inicial das Unidades Espaciais Homogéneas (vd. II.2.3) está identificada a negrito.

A Figura 40 evidencia o predomínio de três famílias: *Solos litólicos não húmicos pouco insaturados, normais*; os *Podzóis Não Hidromórficos Com Surraipa, com horizonte E incipiente*, e os *Podzóis Não Hidromórficos Sem Surraipa, Para-Solos Litólicos*. Os *Podzóis Não Hidromórficos com Surraipa* ocorrem em apenas três formas (PGR F e G), tendo uma importância residual, e o mesmo ocorre com os *Solos Hidromórficos sem Horizonte Eluvial Para-Aluviosolos* (1 forma, PGR F) e os *Aluviosolos Antigos não Calcários, de Textura ligeira* (2 formas, PGR F e G).

Os materiais originários, em grande parte definidos na legenda da Figura 40, são predominantemente arenitos e materiais arenáceos, em acordo com o já descrito predomínio da Formação Argilo-Arenítica nas formas dos três PGR em análise (vd. Figura 39).

Em função da tendência para cada forma estar unicamente associada a uma família de solos, e da ocorrência de famílias unicamente em um dos PGR (Solos Litólicos no PGR F) considerou-se sem utilidade a realização de testes de diferenciação estatística. A análise visual da Figura 40 deixa clara (1) a semelhança entre os contextos pedológicos dos PGR G e H, dominados pelas famílias de Podzóis Não Hidromórficos; (2) a importância destas famílias nos três PGR em análise, já que correspondem também à quase totalidade de cinco das vinte formas do PGR F; (3) a importância dos Solos Litólicos Não Húmicos no PGR F. Considerando o nível mais geral de classificação da Ordem, adoptado na divisão inicial da área de estudo, é claro o predomínio das ordens dos Solos Podzolizados e Litólicos. A presença desta última parece diferenciar o PGR F dos outros dois, em que não ocorre de todo.

3.2.2.3. Índices topográficos

Índice Topográfico de Encharcamento (ITE)

Em ordem a averiguar a existência de relações entre as formas e o ITE, optou-se por recalcular o índice, reclassificando o tema de declives que constitui parte do denominador da expressão de cálculo³² de forma a não conter valores nulos³³, e estabelecendo um valor mínimo de 10 para o tema de área de drenagem específica. Este valor corresponde à área de drenagem específica (área/largura da célula) de uma célula com resolução de 10 m que constitui a totalidade da sua área de drenagem. Evitou-se desta forma que o mapa de ITE final

³² $ITE = \ln \frac{A}{\tan(\beta)}$

³³ Utilizou-se uma expressão condicional no ArcGIS 9.1 para associar um valor de 0,1 graus a todos os valores previamente inferiores a esse valor, mantendo os restantes.

possuísse células sem dados, tal como aconteceria caso se mantivessem valores de 0 no numerador da expressão. Como resultado, todas as superfícies planas passaram a ter um valor de ITE associado, e são distinguidas as áreas de planalto (com áreas de drenagem reduzidas ou inexistentes) e as áreas planas em fundos de vale, onde a convergência da drenagem tenderá a originar um encharcamento muito superior.

Em ordem a caracterizar as formas individuais, os temas associados a cada PGR (F-H) foram sobrepostos ao mapa de ITE³⁴. Com base nesta operação, cada forma passou a ter um valor de ITE médio e máximo associados, calculados com base nas várias células a que se sobrepõe. As médias destes valores foram depois utilizadas para caracterizar cada PGR, sendo esta informação apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 – Síntese da distribuição dos valores de ITE médio e máximo pelas formas associadas aos PGR F, G e H. *DP* é o Desvio-padrão.

PGR	N	ITE médio	DP	ITE máximo	DP
F	20	6,79	2,07	9,23	3,55
G	20	7,97	1,47	11,43	2,59
H	5	7,96	0,97	13,31	2,30

Em ordem a definir o teste mais adequado para aferir as diferenças entre as formas de diferentes padrões testou-se, tal como anteriormente, a normalidade das várias distribuições utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov. Os resultados (Tabela 29) mostram que todas se aproximam da normalidade, não sendo possível rejeitar a hipótese nula (i.e. valores são extraídos de uma distribuição normal) sem uma margem de erro superior a 0,20.

Tabela 29 – Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para a normalidade das distribuições associadas ao ITE. α é a margem de erro implicada na rejeição da hipótese nula. Foram considerados significativos valores inferiores a 0,05.

PGR	n	Variável	D	α
F	20	ITE médio	0,13648	>0,20
		ITE máximo	0,12233	>0,20
G	20	ITE médio	0,14859	>0,20
		ITE máximo	0,14737	>0,20
H	5	ITE médio	0,25974	>0,20
		ITE máximo	0,23840	>0,20

³⁴ Foi usada a ferramenta *Zonal Statistics* do software ArcGIS 9.1

Após os testes de normalidade, utilizou-se o teste de Levene para aferir a homogeneidade das variâncias entre os conjuntos de formas dos vários PGR. Juntamente com a normalidade, a homogeneidade de variâncias constitui o segundo pressuposto inerente à aplicabilidade do teste t (Hill e Lewicki, 2006: 25). Os resultados, apresentados na Tabela 30, mostram que em nenhum dos casos o teste é estatisticamente significativo (i.e. p é sempre superior a 0,05), pelo que a hipótese da homogeneidade de variâncias não pode ser rejeitada (op.cit. 580).

Tabela 30 – Resultados do teste de Levene à homogeneidade das variâncias entre conjugações de formas dos vários PGR (F-H). Os valores correspondem ao valor p resultante do teste.

PGR	F		G		H	
	ITE	ITE	ITE	ITE	ITE	ITE
	Med	Max	Med	Max	Med	Max
F			0,271	0,090	0,188	0,344
G					0,302	0,878
H						

Dada a normalidade que pode ser assumida para as distribuições, utilizou-se o teste t para amostras independentes em ordem a aferir a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as formas dos três PGR. Foi utilizado o software Statistica 6.0, sendo os resultados apresentados na tabela 31.

Tabela 31 – Resultados do teste t para a diferença entre médias dos conjuntos de formas associados a cada PGR (F-H), com relação aos valores de ITE. Valores de p correspondem à margem de erro associada à rejeição da hipótese nula (de que não existe diferença entre as médias de cada par de conjuntos). Valores considerados significativos ($p < 0,05$) foram assinalados a negrito.

PGR	F		G		H	
	ITE	ITE	ITE	ITE	ITE	ITE
	Med	Max	Med	Max	Med	Max
F			<0,06	<0,05	>0,20	<0,05
G					>0,90	>0,15
H						

Os resultados não permitem estabelecer diferenças significativas entre os valores médios, embora p esteja muito próximo do valor considerado significativo entre F e G. Apenas as diferenças entre os valores máximos de ITE por forma entre os PGR F e G, e F e H foram consideradas significativamente diferentes.

Índice de Potência do Escoamento (IPE)

Tal como realizado para o ITE, o tema de IPE foi sobreposto às formas extraídas dos PGR F, G e H. Uma síntese dos valores resultantes é apresentada na Tabela 32.

Tabela 32 – Síntese da distribuição dos valores de IPE pelas formas seleccionadas nos PGR F, G e H. *DP* é o Desvio-padrão.

PGR	N	IPE médio	DP	IPE máximo	DP
F	20	47,19	107,70	301,10	680,63
G	20	8,14	9,21	57,75	96,51
H	5	40,22	29,21	655,20	584,81

A análise da Tabela deixa clara a enorme dispersão nos valores, com desvios-padrão por vezes muito superiores à média. Esta dispersão, contrastante com a verificada para o ITE, resulta em parte da própria fórmula de cálculo (vd. II.2.1), já que o IPE não implica a conversão para logaritmos naturais que tem como consequência a menor amplitude dos valores resultantes.

Os resultados dos testes de normalidade, apresentados na tabela 33, mostram que no caso do PGR F é possível rejeitar a hipótese de normalidade da distribuição com margens de erro inferiores a 5%, o que não ocorre com os outros PGR. Dada a heterogeneidade das distribuições, optou-se pelo teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov para testar a hipótese de que os valores associados a cada conjunto de formas provêm de uma mesma população. Os resultados são apresentados na Tabela 34, e mostram que não é possível encontrar diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes conjuntos de formas.

Tabela 33 – Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para a normalidade das distribuições associadas ao IPE. α é a margem de erro implicada na rejeição da hipótese nula (de que a distribuição é normal). Foram considerados significativos valores inferiores a 0,05.

PGR	n	Variável	D	α
F	20	IPE Med	0,33467	<0,05
		IPE Max	0,35643	<0,01
G	20	IPE Med	0,23371	<0,20
		IPE Max	0,29254	<0,10
H	5	IPE Med	0,24077	>0,20
		IPE Max	0,19522	>0,20

Tabela 34 – Resultados da comparação entre as formas associadas aos PGR F, G e H quanto aos valores de IPE médio e IPE máximo. Foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Resultados são expressos como as margens de erro associadas à rejeição da hipótese nula (i.e. amostras provêm da mesma população). Foram considerados significativos valores $\alpha < 0,05$.

PGR	F		G		H	
	IPE Med	IPE Max	IPE Med	IPE Max	IPE Med	IPE Max
F			>0,10	>0,10	>0,10	>0,10
G					>0,10	<0,10
H						

3.2.2.4. Ocupação do solo

De forma a averiguar as relações entre PGR e ocupação do solo, as formas seleccionadas foram sobrepostas à cartografia CORINE Land Cover (CLC) de 2006.

Como já foi referido (vd. II.3.2), esta análise teve por fim analisar em termos gerais e preliminares as relações entre a presença de ravinas e a ocupação do solo, e apresenta condicionantes a uma leitura que não seja meramente indicativa. Em primeiro lugar, a cartografia CORINE Land Cover assenta na foto-interpretação de informação à escala 1:100000, e está sujeita a uma área mínima cartografável de 25 ha (Bossard *et al.*, 2000), i.e. 25 vezes superior à dimensão mínima adoptada para a delimitação de padrões de ravinamento no presente trabalho. Neste contexto, é possível que uma área fortemente degradada em função do uso (e.g. área de pasto por gado bovino) seja incluída numa classe CORINE totalmente distinta da sua ocupação real (e.g. floresta de sobre, classe 311) desde que a área circundante possua a extensão mínima necessária. Ao mesmo tempo, não pode ser assumido que as formas erosivas que presentemente correspondem a uma ocupação particular resultem da mesma, podendo ser uma herança de situações anteriores.

As relações entre as ravinas seleccionadas nos três PGR e as diferentes classes de ocupação estão representadas na Figura 41.

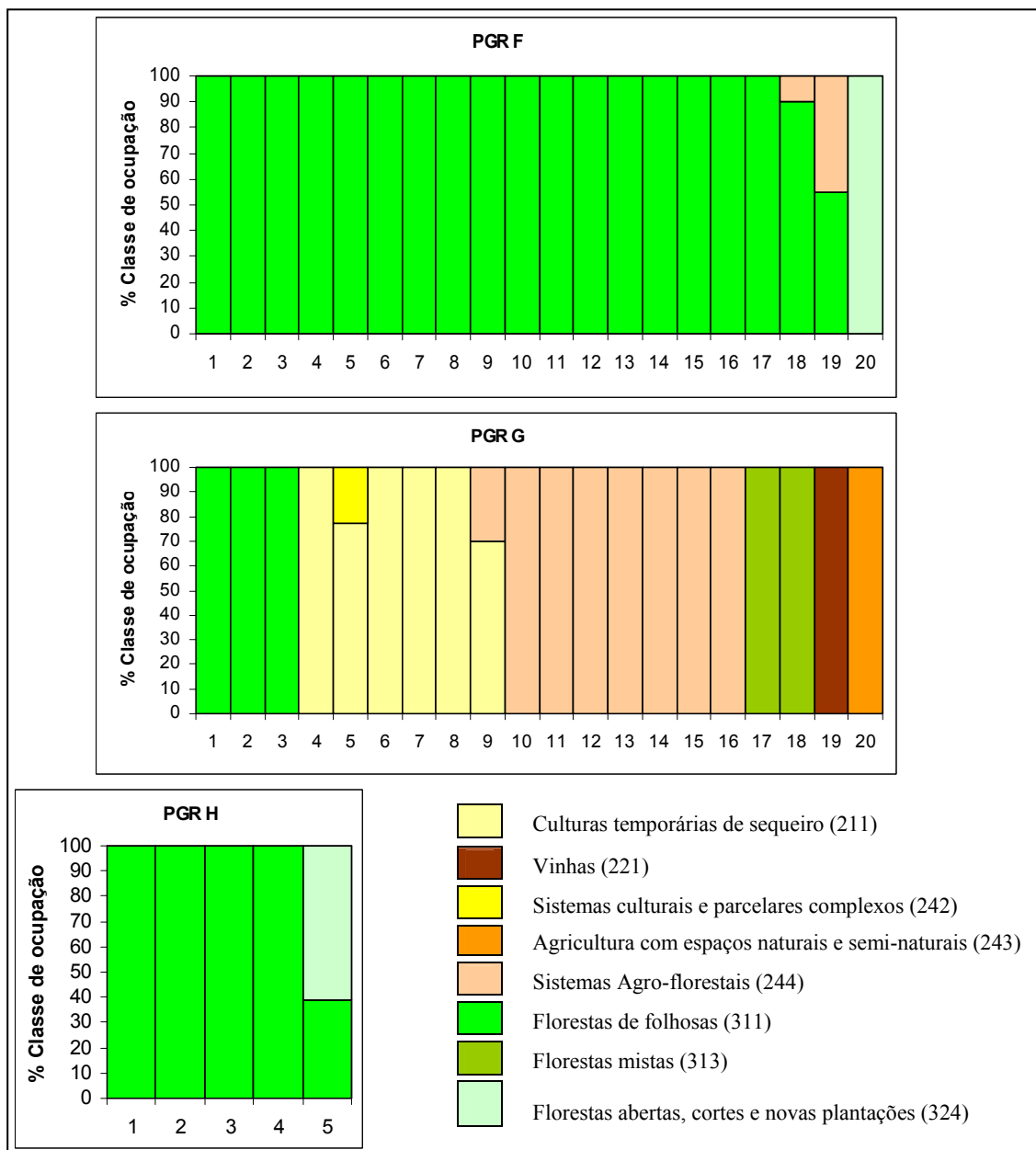


Figura 41 - Percentagens do comprimento correspondentes a cada classe CORINE de ocupação do solo em cada uma das formas individuais associadas aos PGR F-H. O código correspondente na cartografia CORINE Land Cover 2006 encontra-se entre parênteses.

A figura mostra um enorme predomínio das florestas de folhosas no PGR F (correspondentes a montado de sobro) e no PGR H (eucaliptal). No PGR F ocorre ainda uma forma em associação à classe “Florestas abertas, cortes e novas plantações”, e duas com associação parcial a “Sistemas Agro-florestais”. Em todos estes casos, o uso implica, ou é compatível com, extensões de solo relativamente desprotegido pela vegetação, tipicamente na forma de um sub-coberto esparsa por entre o coberto arbóreo (e.g. Figura 32).

No caso do PGR G, verifica-se uma maior variedade de usos, com formas ocorrendo não só em florestas de folhosas (sobre) e sistemas agro-florestais, mas também em vinhas e florestas mistas. Esta maior heterogeneidade parece concordar com a natureza incipiente das formas no PGR G, já que mobilização periódica do solo nas culturas de sequeiro, sistemas agro-florestais e agricultura com espaços naturais e semi-naturais, bem como a manutenção das vinhas, tendem a impedir que as formas se aprofundem.

4. Discussão

4.1. Padrões gerais de ravinamento e factores de controlo

Na perspectiva de conjunto que constituiu o propósito deste capítulo do trabalho, todos os padrões gerais de ravinamento descritos para a área de estudo podem ser enquadrados face ao desenvolvimento da rede de drenagem e ao aprofundamento e alargamento dos vales resultantes. Com base na litologia, é possível definir dois contextos de ocorrência: por um lado, grandes formas entalhando directamente os depósitos grosseiros de conglomerados pliocénicos que definem a superfície culminante regional (PGR A, B, C); por outro, as formas entalhadas sobretudo nas vertentes de argilas, areias e arenitos miocénicos a pliocénicos expostas pelo recuo desta superfície (PGR D, E, F, G e H). Estes dois contextos estão de acordo com os resultados dos testes de diferenciação estatística utilizados, evidenciando a semelhança entre A-B e B-C, a dissemelhança geral entre estes três padrões e todos os restantes (D-H, vd. Tabela 27), e a semelhança que estes últimos apresentam entre si.

Considerando o grau de desenvolvimento das formas, a análise da localização dos padrões no relevo de sombras obtido a partir de um MNE (Figura 24, resolução 10 m) torna clara uma separação entre aqueles com formas de grandes dimensões (PGR A-E) e os que apresentam formas bastante menos desenvolvidas (F, G e H). Os primeiros definem-se ao longo do sector N da área de estudo, concentrando-se especialmente ao longo da rib^a de Ulme e a N da Chamusca. Por oposição, os padrões com formas mais incipientes ocorrem no sector S da área de estudo, ao longo dos vales das ribeiras de Muge e tributárias (Lamarosa, Almofada, Rosmaninhal, Calha do Grou), bem como das ribeira de Sor e da Erra. Toda esta área é caracterizada por uma topografia mais suave e dissecada pela rede hidrográfica, na qual a presença dos conglomerados se limita frequentemente aos interflúvios (vd. Figura 14).

Em função das diferentes escalas espaciais e temporais associadas a estes dois grupos de padrões, as suas relações com os diferentes factores de controlo serão discutidas em separado.

4.1.1. Grandes ravinas e complexos de ravinas: PGR A-E

No que diz respeito às formas de grandes dimensões, são de salientar: (i) a ausência de entalhes nos fundos aluvionares dos vales onde ocorrem (e.g. rib^a de Ulme e tributárias, rib^a do Vale do Casal Velho) (Figura 42); (ii) a desconexão quase total ou total entre as formas e os seus vales colectores, sejam estes de fundo aluvionar ou não (Figs. 42 e 43)³⁵; (iii) o seu estado de inactividade total ou parcial; e (iv) o avançado estado de evolução de muitas delas, atingindo os limites superiores das próprias vertentes, e evoluindo essencialmente através de movimentos de massa nas paredes e cabeceira (complexos de ravinas). Estas características tornam evidente que as condições ambientais que assistiram ao ravinamento activo nestes vales já não se verificam. Ao mesmo tempo, implicam pelo menos uma fase de aluviação ocorrida desde o entalhe dos fundos de vale, desconectando e promovendo a estabilização das formas mais a montante. Considerou-se implícita a ocorrência passada de entalhe nos fundos, dada a extensão de muitas das grandes formas existentes quase até à base das vertentes onde ocorrem, incompatível com a hipótese de que estas formas teriam evoluído sem conexão com canais colectores capazes de escoar as grandes quantidades de material removido.



Figura 42 – Formas desconectadas de fundo de vale aluvionar, não entalhado. O grande complexo de ravinas assinalado com uma seta em (a) está presentemente desconectado do fundo aplanado da rib^a de Ulme, no limite inferior da imagem; (b) interior da forma, na área junto à seta em (a). Notar, para além das grandes dimensões, os depósitos de material e o sobreiro desenraizado, evidenciando actividade.

³⁵ Neste contexto, vd. também as Figura 21 (a) e (e), e 31 (a).

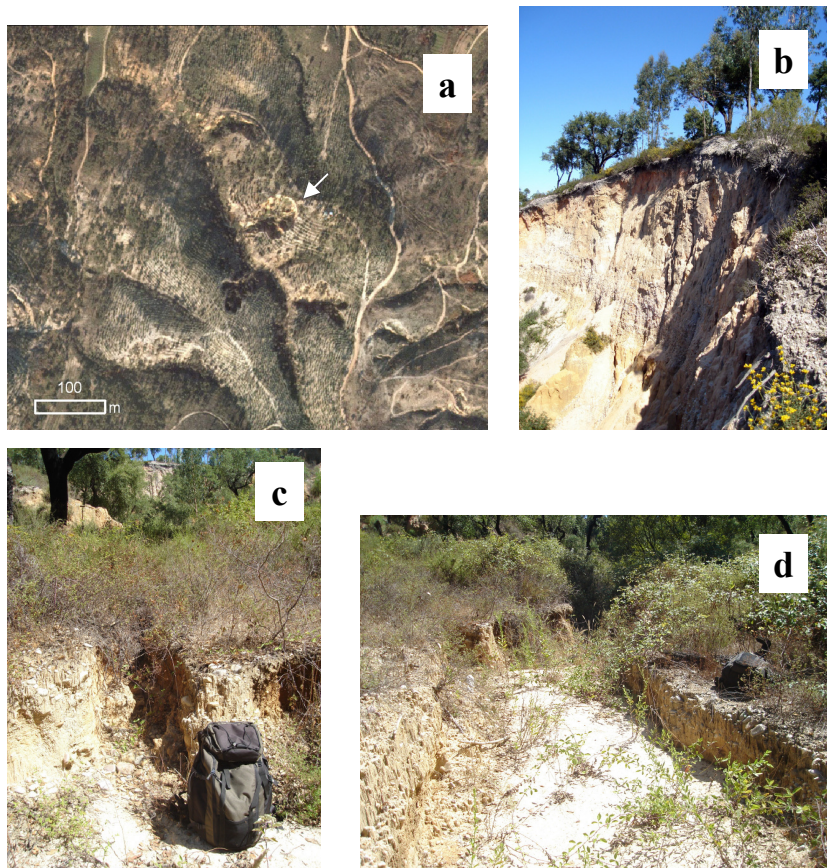


Figura 43 - Exemplo da desconexão quase total entre as formas e os seus vales colectores. A forma assinalada com uma seta em (a) consiste num complexo de ravinas de dimensões decamétricas, cuja cabeceira é apresentada em (b); (c) desembocadura da forma, em contraste com a escala desta, e ajustada à dinâmica actual; (d) o canal que drena a desembocadura da forma, de profundidades decimétricas (objecto é a mesma mochila que em (c)). Freguesia de Ulme, Chamusca.

No contexto geomorfológico sugerido de entalhe fluvial e posterior assoreamento, é possível enquadrar os padrões gerais definidos de forma sequencial. É importante considerar, porém, que este enquadramento não pressupõe que o ravinamento é um fenómeno inerente às diferentes etapas da evolução da rede de drenagem, mas apenas que a sua ocorrência observada pressupõe a ocorrência prévia dessas etapas. Para que os processos morfogenéticos responsáveis pelos diferentes PGR tomem lugar, torna-se adicionalmente necessário um contexto ambiental específico. Por exemplo, não pode ser assumido que o alargamento dos vales implica a formação de ravinas simples e em complexos tal como ocorrem actualmente na rib^a de Ulme (Figs. 28-31), e que portanto estes padrões caracterizaram no passado os vales das ribeiras de Muge e do Chouto, actualmente enquadrados por declives mais suaves. Porém, o afloramento de maiores extensões de arenitos e argilas com o alargamento dos vales é necessariamente uma condição para a ocorrência destes padrões na área de estudo, a que se juntam condições ambientais específicas, de que poderiam constituir hipotéticos exemplos a

formação de um declive crítico para o entalhe, a remoção do coberto vegetal, ou particularidades na litologia local.

A articulação dos vários padrões com formas de grandes dimensões (A-E) face à evolução da rede de drenagem é apresentada na forma de uma hipotética sequência de desenvolvimento na Figura 44. Cronologicamente, esta sequência teria tido lugar no período decorrido desde o início do encaixe da actual rede de drenagem na área de estudo, há cerca de 2 milhões de anos (Martins, 2004: 51). Apesar de ser aqui apresentada de forma contínua, não são excluídas fases intermédias de estabilidade e desenvolvimento, cujos enquadramentos temporais ultrapassam o âmbito geral desta parte da investigação.

No que diz respeito a possíveis factores de controlo gerais, três possibilidades se apresentam como plausíveis: (i) a descida do nível de base (Tejo) durante o Plistocénico, levando à regressão/bifurcação das cabeceiras e ao aprofundamento/alargamento dos canais; (ii) fases de precipitações excepcionais, promovendo o aprofundamento e desenvolvimento da rede fluvial em função da erosividade acrescida (da própria precipitação e do escoamento gerado); e (iii) alterações significativas no uso do solo, i.e. desflorestação, induzindo a redução da capacidade de infiltração e o aumento do escoamento superficial, e reduzindo a protecção conferida ao solo pelo coberto vegetal natural.

A partir de uma profundidade crítica na rede de drenagem, as propriedades mecânicas do rególito (a Formação Argilo-Arenítica já referida; vd. II.3.2.2.1) terão promovido a ocorrência de movimentos de massa e a bifurcação de cabeceiras e, subsequentemente, o surgimento de complexos de ravinamento. Esta suposição, em acordo com a noção proposta por Betts *et al.* (2003) de um limiar geomórfico a partir do qual a expansão por movimentos de massa adquire uma importância significativa no ravinamento, é sugerida por dois factos, considerados de seguida separadamente.

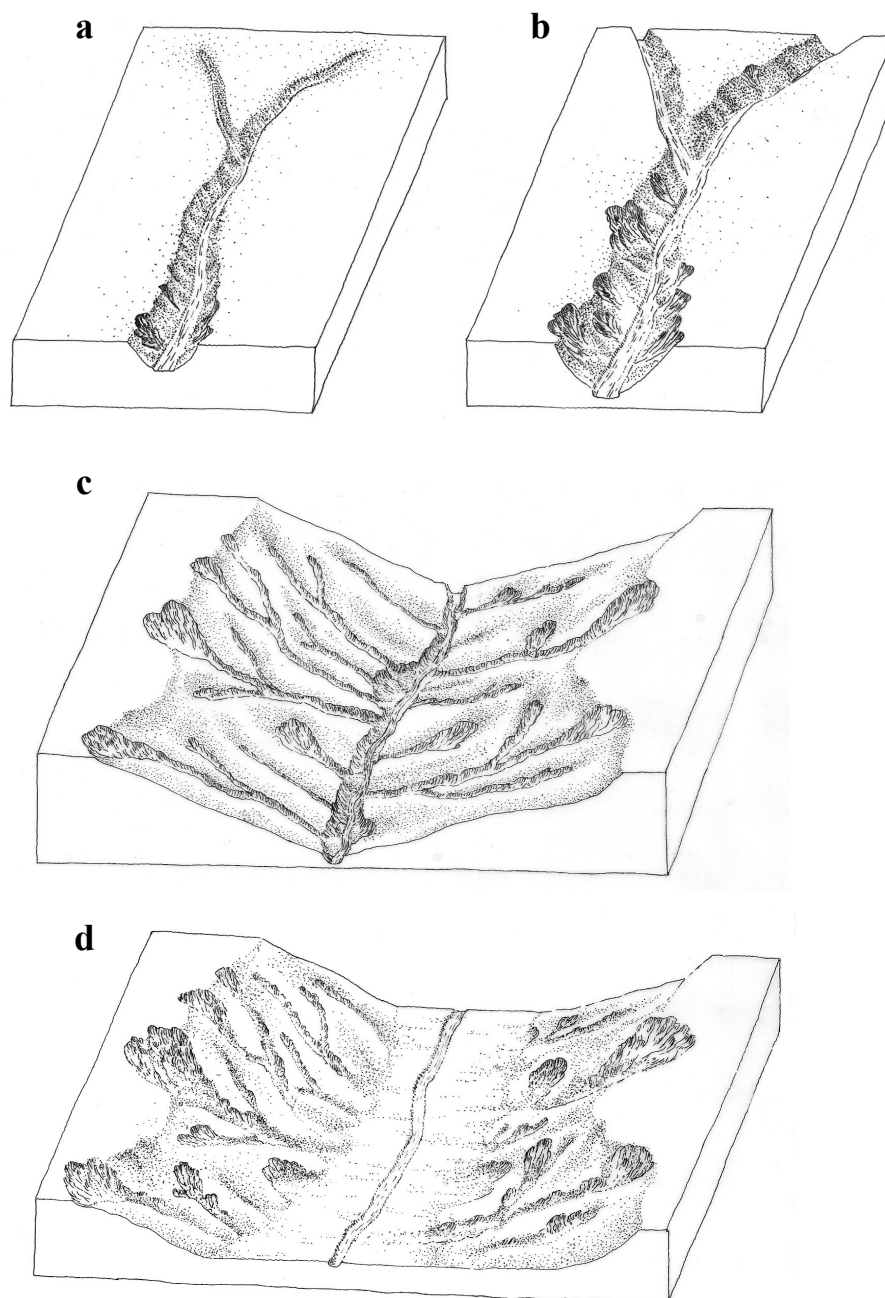


Figura 44 – Relação hipotética entre os PGR definidos e a evolução da drenagem. (a) entalhe inicial da superfície culminante. Progressão das cabeceiras para montante (PGR A); aprofundamento e alargamento a jusante (PGR B); b) continuação do processo resulta na exposição progressiva de maiores extensões de arenitos e argilas, onde se desenvolvem complexos de ravinas (PGR C); c) recuo progressivo da superfície culminante origina vertentes de arenitos/argilas relativamente extensas. Entalhe da rede de drenagem leva à formação de redes de ravinas/complexos de grandes dimensões (PGR D e E); d) Assoreamento dos fundos de vale. Desconexão e estabilização das redes de ravinas, mas não dos complexos, evoluindo sobretudo através de movimentos de massa potenciados pelo comportamento hidrológico do rególito e pela topografia. Situação actual na rib^a de Ulme e área envolvente.

Em primeiro lugar, as formas de maiores dimensões concentram-se ao longo da rib^a de Ulme e nas proximidades, onde as vertentes correspondentes à Formação Argilo-Arenítica possuem não só grande extensão, mas também comandos e declives relativamente elevados. Em ordem a verificar até que ponto as condições topográficas permitem distinguir a rib^a de Ulme na área de estudo, foram seleccionados quatro outros cursos de água, drenando para diferentes direcções e com diferentes posições face ao curso do Tejo: a rib^a de Muge (drenando para o Tejo a W), a rib^a da Erra (drenando numa direcção NE-SW para o Sorraia), a rib^a de Margem (drenando numa direcção N-S para a rib^a de Sor), e o rio Torto, drenando numa direcção SSE-NNW para o Tejo (Figura 45). Com base na topografia 1:25000 da Carta Militar de Portugal, foi utilizado um curvímetro digital para construir perfis longitudinais dos cinco cursos de água desde as cabeceiras até à confluência com os respectivos colectores. A única excepção foi a rib^a de Ulme, para a qual o perfil foi construído apenas até à curva de nível dos 20 m, já que é pouco depois desse ponto (identificado na Figura 45) que a ribeira deixa o seu vale e é canalizada pela vala do Paul ao longo da planície aluvial do Tejo.

Com base nos perfis longitudinais, foram definidas as posições ao longo de cada curso de água correspondentes a 20, 40, 60 e 80% da distância total à cabeceira. Estas posições foram utilizadas para o estabelecimento de perfis transversais (identificados como barras a negro na Figura 45), que permitiram caracterizar as vertentes encaixantes quanto ao comando e ao declive³⁶. A análise dos resultados, sintetizados nas figuras 46 e 47, permite efectivamente distinguir a rib^a de Ulme, já que o seu sector terminal, de acordo com os perfis correspondentes a 60 e 80% da distância total à cabeceira, é marcado pela ocorrência dos maiores comandos médios (respectivamente 90 e 110 m), e declives médios (10,3° e 12,1°) de todos os cursos de água considerados. A comparação com a Figura 24 mostra que é precisamente neste sector que se concentram as grandes ravinas/complexos observados ao longo da ribeira. Adicionalmente, a Figura 46 evidencia que a rib^a de Ulme apresenta declives relativamente elevados em todos os perfis transversais.

³⁶ O comando foi caracterizado com base na análise visual das cartas. O declive médio para cada vertente foi determinado sobrepondo um tema cartográfico com os perfis a um tema de declives e calculando a média dos valores para as células abrangidas por cada perfil (ferramenta *Zonal Statistics* no ArcGIS 9.1).

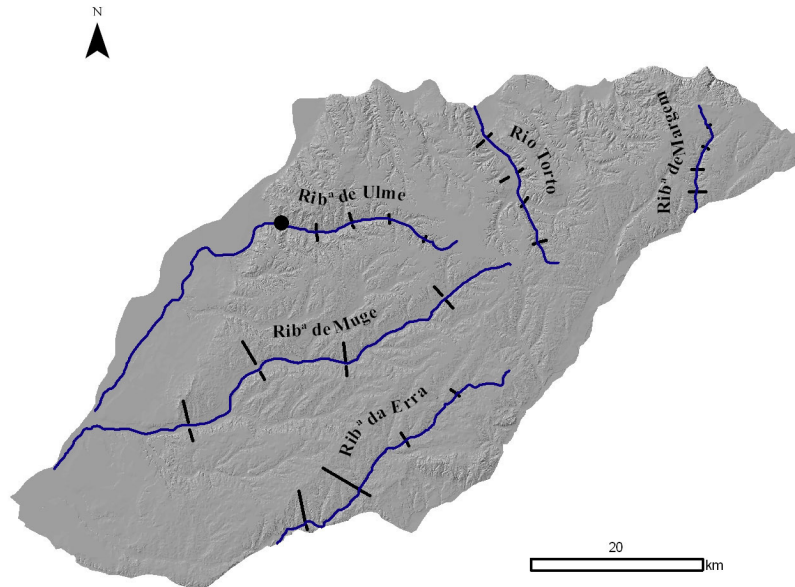


Figura 45 – Os cinco cursos de água considerados na comparação de declives e comandos em perfis transversais. As barras a negro definem as secções das vertentes correspondentes a 20, 40, 60 e 80% da distância total medida entre a cabeceira e a confluência com o curso de água colectora. O ponto a negro marca o limite adoptado para a ribª de Ulme, correspondente à curva de nível dos 20 m, após a qual a ribeira é canalizada pela vala do Paul ao longo da planície aluvial do Tejo.

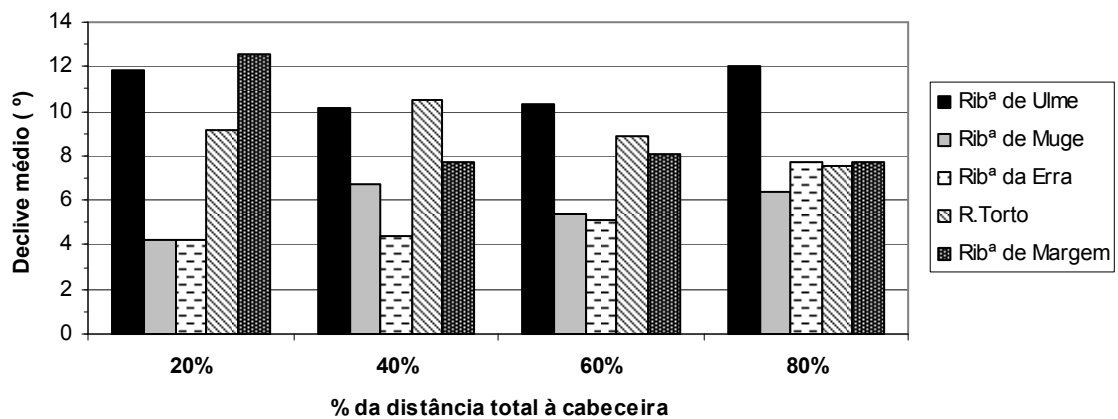


Figura 46 – Declives médios das vertentes encaixantes nos vários perfis transversais estudados. Os fundos de vale não foram considerados.

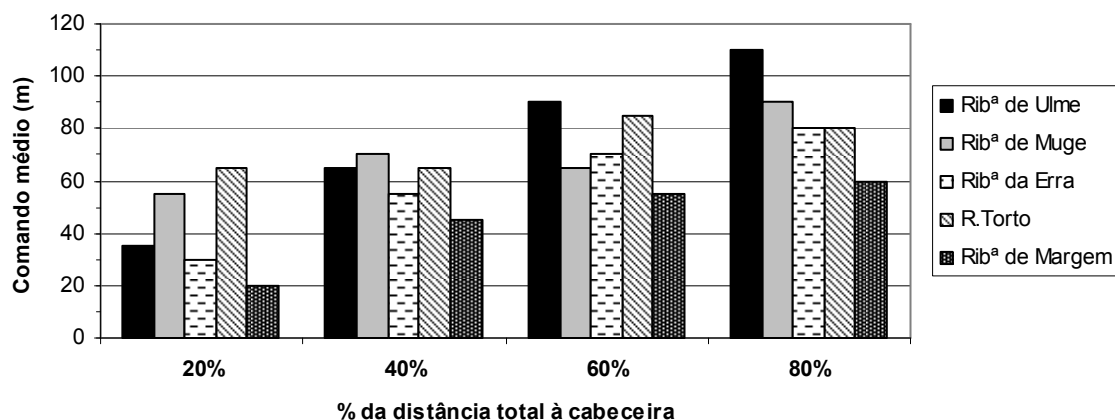


Figura 47 – Comandos médios para os vários perfis transversais estudados. Em cada perfil, o valor corresponde à média dos comandos das duas vertentes.

Em segundo lugar, a ideia de um grau de entalhe crítico a partir do qual os movimentos de massa terão sido activados é sugerida pelo facto de as grandes ravinas simples se encontrarem presentemente inactivas, ao contrário dos complexos. A análise da literatura e a observação de campo sugerem claramente que a dinâmica actual destes complexos não depende da acção erosiva do escoamento superficial que para eles converge, mas sim da dinâmica gravitacional que tem lugar nas paredes e cabeceiras em associação ao comportamento hidrológico dos materiais, provocando uma regressão sucessiva e frequentemente mantendo um carácter vertical (e.g. Wells *et al.*, 1991; De Rose *et al.*, 1998, Bacellar *et al.*, 2005). Neste contexto, será de esperar que, uma vez eliminadas as condições ambientais que promoveram o entalhe e a regressão da rede fluvial, a actividade nos canais se detenha, o mesmo não acontecendo com os processos gravitacionais que a sua evolução anterior activou. Essa parece ser a situação presente.

É importante salientar que a distinção dos três possíveis factores de controlo já referidos não exclui interações, à semelhança do que tem sido determinado para outros locais. Por exemplo, na Bavária, a intensidade do uso do solo e a resultante desflorestação são dadas por Dotterweich *et al.* (2003), juntamente com um evento extremo de precipitação, como factores de formação de uma ravina de vários metros de profundidade na primeira metade do séc. XIV, hoje preenchida por sedimentos. Numa região da Eslováquia, Stankoviansky (2003) descreveu as relações entre a localização e configuração de antigas ravinas e elementos relacionados com o uso do solo, tanto lineares (caminhos, limites de propriedades), como areaais (pastagens), considerando a acção antrópica como factor importante em duas fases de ravinamento a partir do séc. XVI, juntamente com a ocorrência de precipitações intensas no

contexto da Pequena Idade do Gelo. Na Alemanha, a análise de numerosos perfis de solo em seis áreas de estudo permitiu a Bork (1989) associar fases de ravinamento intenso à primeira metade do séc. XIV e à segunda metade do Séc. XVIII, e a episódios de precipitação excepcional. Na primeira destas fases, entalhes com mais de 5 m de profundidade surgiram frequentemente nas vertentes e fundos de vale.

Na área de estudo em particular, a associação entre ocupação humana e erosão activa é sugerida pelos topónimos que fazem referência a escoamento carregado de sedimentos, como são os casos de *Lamaceiras*, *Vale da Lama* (ocorrendo em dois locais diferentes), *Vale da Lama da Atela* ou *Sobreiral das Lamas*, todos no concelho da Chamusca. Adicionalmente, a utilização de areias, de cascalheiras para a pavimentação de estradas e das argilas para o fabrico de telhas e tijolos tem uma longa história (Gonçalves *et al.*, 1979: 61-65). É plausível que pelo menos uma parte dos muitos complexos observados tenha na presença de locais de extracção um factor importante de surgimento e/ou evolução.

Considerando a duração potencial da dinâmica morfogenética que esteve na origem das grandes formas observadas, o estabelecimento de uma cronologia da erosão e sedimentação em bacias como a da rib^a de Ulme teria a maior utilidade, constringendo no tempo os episódios erosivos, e conseqüentemente os possíveis factores responsáveis. Para além das indicações cronológicas, a análise dos materiais aluviais nos fundos de vale e dos depósitos coluviais no interior das próprias formas poderia ajudar a caracterizar o ambiente que assistiu à sua evolução, fornecendo indicações preciosas para a identificação dos seus factores de controlo. Exemplos extraídos da literatura incluem a datação por luminescência opticamente estimulada de depósitos coluviais do interior de ravinas (Lang e Matusz, 2006), a datação arqueológica de fragmentos de cerâmica e radiométrica (¹⁴C) de fragmentos de carvão extraídos do enchimento de uma ravina (Dotterweich *et al.*, 2003), ou a caracterização paleo-ambiental de fases erosivas com recurso a análise palinológica (Nogueras *et al.*, 2000: 214)

4.1.2. Formas relativamente incipientes: PGR F-H

No que concerne às relações com a litologia, as associações entre estes padrões de ravinamento e os arenitos e argilas mio-pliocénicos (i.e. Formação Argilo-Arenítica) já foram descritas, bem como a semelhança entre os três PGR. Resta salientar a quase total ausência de formações aluvionares em associação às ravinas (Figura 39), evidenciando a sua posição nas vertentes, por oposição aos fundos de vale para os quais drenam. Esta posição topográfica é

igualmente confirmada pelas famílias de solos, através da importância residual dos solos hidromórficos (Figura 40).

Considerando os tipos de solos observados, não é possível encontrar associações entre as propriedades inerentes a cada família e o diferente grau de entalhe das formas nos PGR G ou H face a F. Ao nível geral das ordens, também não é possível assumir diferenças em termos de resposta erosiva entre os Solos Podzolizados e os Solos Litólicos, as duas ordens dominantes.

Os dois índices topográficos também não permitem fazer distinções, já que apenas o Índice Topográfico de Encharcamento máximo ao longo das formas é significativamente diferente entre F e os restantes padrões (Tabela 31), e não há diferenças significativas entre os valores médios e máximos de Índice de Potência do Escoamento (Tabela 34).

Face à aparente incapacidade dos dois índices para diferenciar formas que são claramente controladas pela topografia, é importante considerar as limitações impostas pela escala da informação original. A análise das formas sobre o MNE utilizado mostra claramente que a topografia produzida com base nas curvas de nível 1:25000, embora adequada à modelação hidrológica que esteve na origem dos temas dos dois índices usados na caracterização regional, é excessivamente generalizada para uma análise à escala da forma individual, originando superfícies planas onde na realidade existem depressões. Estas limitações resultam na modelação de linhas de acumulação de escoamento rectas e desajustadas das linhas de água reais, a que as ravinas frequentemente se associam (Figura 48).

Esta inexactidão implica que a aplicação de modelos numéricos de elevação (e da informação deles derivada) a formas destas dimensões necessitará de informação de base de escala superior à 1:25000 utilizada, e portanto com uma maior densidade de pontos cotados³⁷. Um exemplo desta informação é a resultante da tecnologia Lidar, já aplicada ao ravinamento por Perroy *et al.* (2010). Alternativamente, vários autores têm adoptado medições de áreas de drenagem e declives no terreno (e.g Vandekerckhove *et al.*, 1998, 2003; Nachtergaele *et al.*, 2001).

³⁷ A introdução de informação hidrográfica (e.g. produzida à escala 1:25000 pelo Instituto Geográfico do Exército) aumentará necessariamente o ajustamento entre a hidrologia modelada e as formas. No entanto, não alterará o desajustamento entre as secções das vertentes artificialmente rectas (resultantes das curvas de nível) e as formas que não têm correspondência no tema de hidrografia.

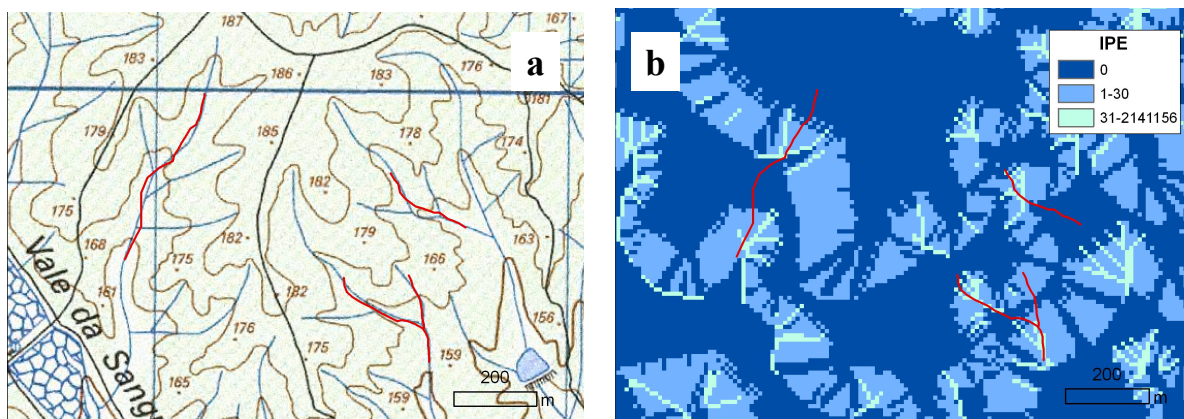


Figura 48 - Sobreposição de quatro formas associadas ao PGR G à Carta Militar 1:25000 (Folha 367 – Foros do Arrão) (a), e ao tema de Índice de Potência do Escoamento (b), classificado de forma a evidenciar os contrastes existentes. Notar o ajustamento das formas (a vermelho escuro) às linhas de água (a azul) em (a) e, por oposição, as áreas de valor 0 (artificialmente consideradas planas) e a concentração dos valores mais elevados de IPE em arestas na convergência de polígonos do TIN que serviu de base ao índice em (b), em claro desajuste à configuração real das ravinas.

Por último, e apesar das condicionantes já referidas para a aplicabilidade da cartografia CORINE, a análise da ocupação do solo permitiu constatar que as formas dos PGR F e G estão presentemente associadas a usos diversos, embora com um denominador comum: a mobilização periódica do solo, seja em culturas anuais de sequeiro, ou num contexto de culturas associadas a usos florestais (e.g. Figura 32 a-c). Esta mobilização acarreta períodos de coberto vegetal inexistente e coesão entre partículas/coerência entre os agregados condicionada. Ao mesmo tempo, o uso destas áreas florestais como pasto de gado bovino foi frequentemente observado, constituindo este outro factor de perturbação e compactação do solo (e.g. Figura 34-b) frequentemente descrito na literatura.

A relação entre uso do solo e erosão é ilustrada pelas duas fotografias na Figura 49. Ambas as formas distam cerca de 200 m, estando uma activa e em associação a solo lavrado (forma b), e a outra estabilizada, colonizada pela vegetação que se desenvolveu livremente (forma a).

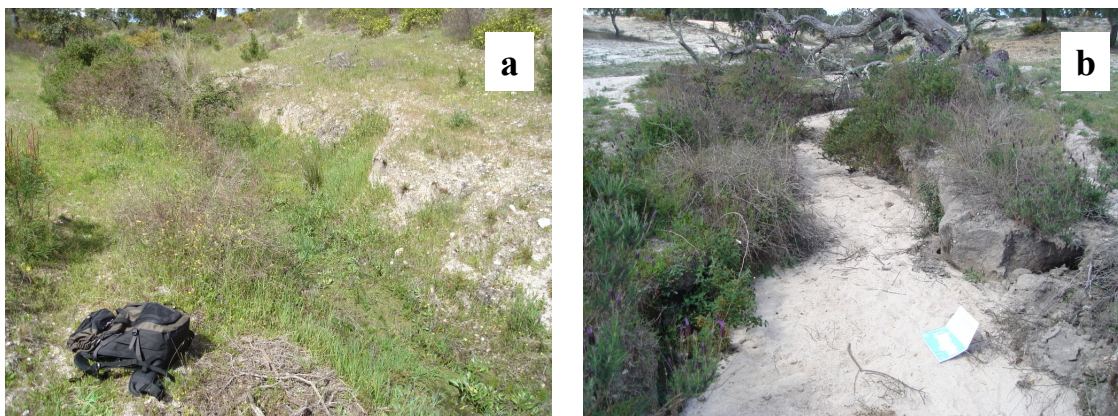


Figura 49 – A aparente influência do uso do solo sobre a erosão. A forma em (a), situada em terreno inculto, está estabilizada. A forma em (b), a uma distância de cerca de 200 m e em terreno lavrado, está activa. Os contextos litológicos e topográficos são semelhantes. Freguesia do Chouto, Chamusca.

O PGR H constitui uma excepção ao padrão de mobilização do solo, já que está inteiramente associado a floresta de eucaliptos sem qualquer uso agrícola associado.

Numa perspectiva integradora dos PGR F, G e H, a análise das relações com os vários factores de controlo permitiu definir que as formas ocorrem nas vertentes, por oposição aos fundos de vale, frequentemente de forma descontínua. Desenvolvem-se sobre materiais arenosos, naturalmente com pouca coesão e relativamente erodíveis (vd. descrições do material originário nas famílias de solos, Figura 40), e estão na sua enorme maioria associadas a usos que implicam perturbação e susceptibilidade acrescida à erosão. Dada a ausência de associações entre grau de entalhe e família de solo, os controlos fundamentais sobre as características destas formas parecem ser a topografia e o uso, com um efeito a ser exercido necessariamente pelas propriedades do rególito (e.g. resistência tangencial, propriedades texturais), mas sem expressão na classificação de solos utilizada.

4.2. Ravinas sem padrão: a influência dos elementos antrópicos

Por ocorrer de forma generalizada e em paralelo com todos os PGR definidos, não pode deixar de ser referida numa síntese regional a associação entre ravinamento e elementos antrópicos. Esta classe de formas é frequentemente indetectável em ortofotos em função do seu carácter disperso e semelhança com os elementos que lhe estão na origem. Porém, as observações realizadas no terreno revelaram que a sua ocorrência é sistemática na totalidade da área de estudo, e com especial incidência nas áreas de declives mais acentuados que caracterizam o seu sector Norte (e.g. rib^a de Ulme).

A acção dos elementos antrópicos tem expressão de três formas essenciais. As vias de circulação, frequentemente definidas no sentido de maior declive, concentram o escoamento, promovendo entalhes, seja no interior da via (Figura 50-a) ou nas bermas (Figura 50-b).

Os aterros, frequentemente constituindo os limites laterais que separam as vias das vertentes envolventes ou socalcos em povoamentos florestais (eucalipto), constituem locais de ocorrência de movimentos de massa e formação de novas cabeceiras, que regridem posteriormente na forma de ravinas de desnível (*bank gullies*), tal como foram já descritas no enquadramento teórico (Figura 51).



Figura 50 – Exemplos de ravinamento em associação a estradas não pavimentadas e caminhos. Objecto em (a) é uma mochila. Freguesia de Ulme, Chamusca.

Por último, as valas constituem por natureza elementos lineares de concentração do escoamento que, quando localizadas sobre materiais erodíveis, se aprofundam e expandem lateralmente. Paralelamente à sua função de drenagem, passam assim a constituir fontes de sedimento, aumentam a conectividade ao longo das bacias para sedimentos erodidos no local e a montante, e podem promover o surgimento de ravinas de desnível através da formação de novas cabeceiras nas margens dos canais (Figura 52).

Pela sua natureza dispersa e não sistemática, e por frequentemente não serem observáveis em ortofotos, as formas associadas a elementos antrópicos não foram abrangidas pela metodologia de delimitação de padrões adoptada. Porém, a observação de campo deixou claro que constituem uma importante manifestação do ravinamento activa na área de estudo e um tema relevante para investigação futura.



Figura 51 – Associação entre ravinamento e desníveis topográficos, frequentemente resultantes de aterros/desaterros nas bermas de estradas e caminhos. (a) Ravina de desnível no desaterro entre uma extensão de eucaliptal e uma estrada. (b) Cabeceira em regressão e bifurcação após o seu surgimento no desaterro entre um olival e a estrada nacional. Ambas as formas se situam na freguesia de Ulme, Chamusca.



Figura 52 – Associação entre ravinamento e valas de drenagem. (a) Alvega, Abrantes. (b) Ravina de desnível em evolução a partir de vala de drenagem (abaixo da área fotografada). Notar tentativa de estabilização através da deposição de resíduos agrícolas e estaca suspensa, indicando o local da superfície topográfica original. Foros de Arrão, Ponte de Sor.

4.3. Implicações teóricas

As formas e padrões observados vieram confirmar a variabilidade que o ravinamento pode assumir e acentuar fortemente a noção, já defendida teoricamente no Capítulo I, de que este fenómeno deve ser abordado como tendo uma natureza mista, i.e. como resultando da conjugação de processos hídricos e movimentos de massa.

Na área de estudo, a interacção entre o surgimento de instabilidades topográficas (i.e. canais, desníveis) e movimentos de massa, contribuindo para restabelecer a estabilidade através da diminuição dos declives, ocorre com enorme frequência na forma de cabeceiras, particularmente abundantes onde maiores extensões de materiais relativamente erodíveis foram expostas pelo recuo dos materiais mais grosseiros da superfície culminante. Estas formas apresentam evidentes analogias morfológicas, não só ao longo de diversas escalas, mas também em condições topográficas muito diferentes, desde declives suaves a superfícies quase verticais, incluindo as paredes de cabeceiras maiores.

De acordo com o modelo de desenvolvimento proposto por Collison (2001), já descrito (vd. Cap. I.4.2), o surgimento e alargamento de uma concavidade (i.e cabeceira) ao longo de uma superfície promoverá um ciclo de: (i) fracturação a montante e sapamento basal causados pela libertação de tensão; (ii) concentração e aceleração do escoamento sub-superficial na base, promovendo o aumento da pressão intersticial e a redução da coesão do material; (iii) colapso, sendo que o escoamento posterior remove o material depositado, promovendo a manutenção de paredes declivosas e o recomeçar do ciclo. Esta sequência pode ser adicionalmente complementada por processos como a tubulação, a formação de uma depressão basal (*plunge-pool*) pelo impacto do escoamento precipitado do alto da cabeceira, ou o *fluting*, tendo todos sido já referidos.

Um mecanismo semelhante ao de Collison (2001) foi sugerido por Wells *et al.*, (1991) e Wells (2004) para o desenvolvimento de complexos de ravinas em Madagáscar, cujas semelhanças com as formas observadas são notáveis. De acordo com a sequência proposta por estes autores, com a evolução progressiva da forma para o interior da vertente o comando da cabeceira torna-se progressivamente maior, com a deposição de material a promover em simultâneo a instalação da vegetação no fundo. A partir do ponto em que a forma intersecte porções do rególito com elevado teor em água, o afloramento desta contribui para a sua expansão dramática através de colapsos (Wells, 2004: 505), expansão que será adicionalmente promovida no caso de cabeceiras com grandes comandos (e portanto tensões mecânicas muito elevadas).

Em síntese, e integrando o enquadramento teórico anteriormente construído com a observação das formas na área de estudo, (i) as semelhanças morfológicas observadas entre cabeceiras através de diferentes escalas (Figura 53); (ii) a noção de que a sua evolução é controlada sobretudo por movimentos de massa; (iii) a evidente relação entre os mecanismos propostos por Collison (2001) e Wells *et al.* (1991) e a topografia (controlando o ângulo do plano de ruptura tangencial, a altura da cabeceira em recuo e a tensão sobre ela exercida pelo material);

e (iv) as analogias morfológicas entre os complexos de ravinas observados no campo e outras formas descritas na literatura (Figura 54) sugerem que o comportamento das cabeceiras assume um papel fundamental na morfodinâmica das ravinas, já que é através de diferentes associações entre a sua expansão (em todas as direcções), recuo (expansão sobretudo para montante), bifurcação e iniciação (em paredes de canais ou superfícies ainda não erodidas, por exemplo através de movimentos de massa) que uma forma incipiente pode evoluir para um sistema em rede, um complexo, ou uma combinação de ambos. No caso dos complexos, muito menos estudados, os exemplos publicados incluem, entre outros, os grandes complexos descritos na Nova Zelândia (Betts *et al.*, 2003; Parkner *et al.*, 2006), em Madagáscar (Wells *et al.*, 1991) e os *calanchi* característicos das áreas de *badlands* italianas (Moretti e Rodolfi, 2000; Buccolini e Coco, 2010), cujos notáveis paralelos morfológicos com formas observadas na área de estudo são observáveis na Figura 54.

Para cada contexto ambiental, a posição das formas originadas dentro deste hipotético espectro de variação será definida pelo clima, a natureza do rególito, a estrutura e a morfologia das vertentes, controlando as interacções entre a velocidade, a acumulação e a direcção do escoamento superficial e sub-superficial, e a variação na forma e altura das cabeceiras ao longo do processo evolutivo. Nos casos mais dinâmicos, em que movimentos de massa provocam a expansão continuada da perturbação topográfica original, a coalescência dos complexos gerados origina áreas de degradação contínua, das quais um exemplo incipiente, no município da Chamusca, é mostrado na Figura 29.

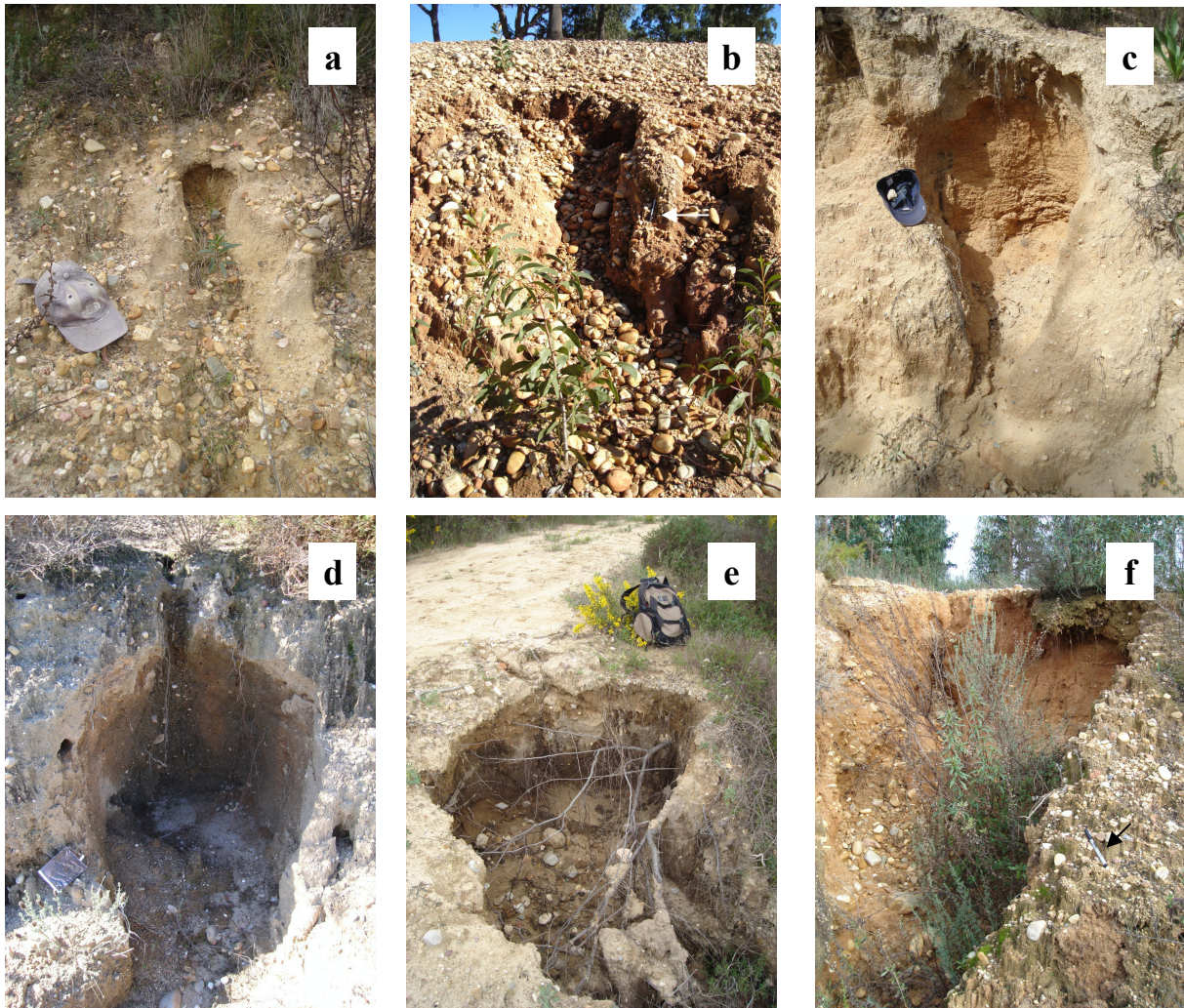


Figura 53 – Analogias morfológicas na formação e expansão de cabeceiras em diferentes escalas de análise, e em diferentes materiais. Notar o material extremamente grosseiro em (b), onde a seta aponta uma caneta como referência. Objecto em (d) é uma folha de tamanho A5.

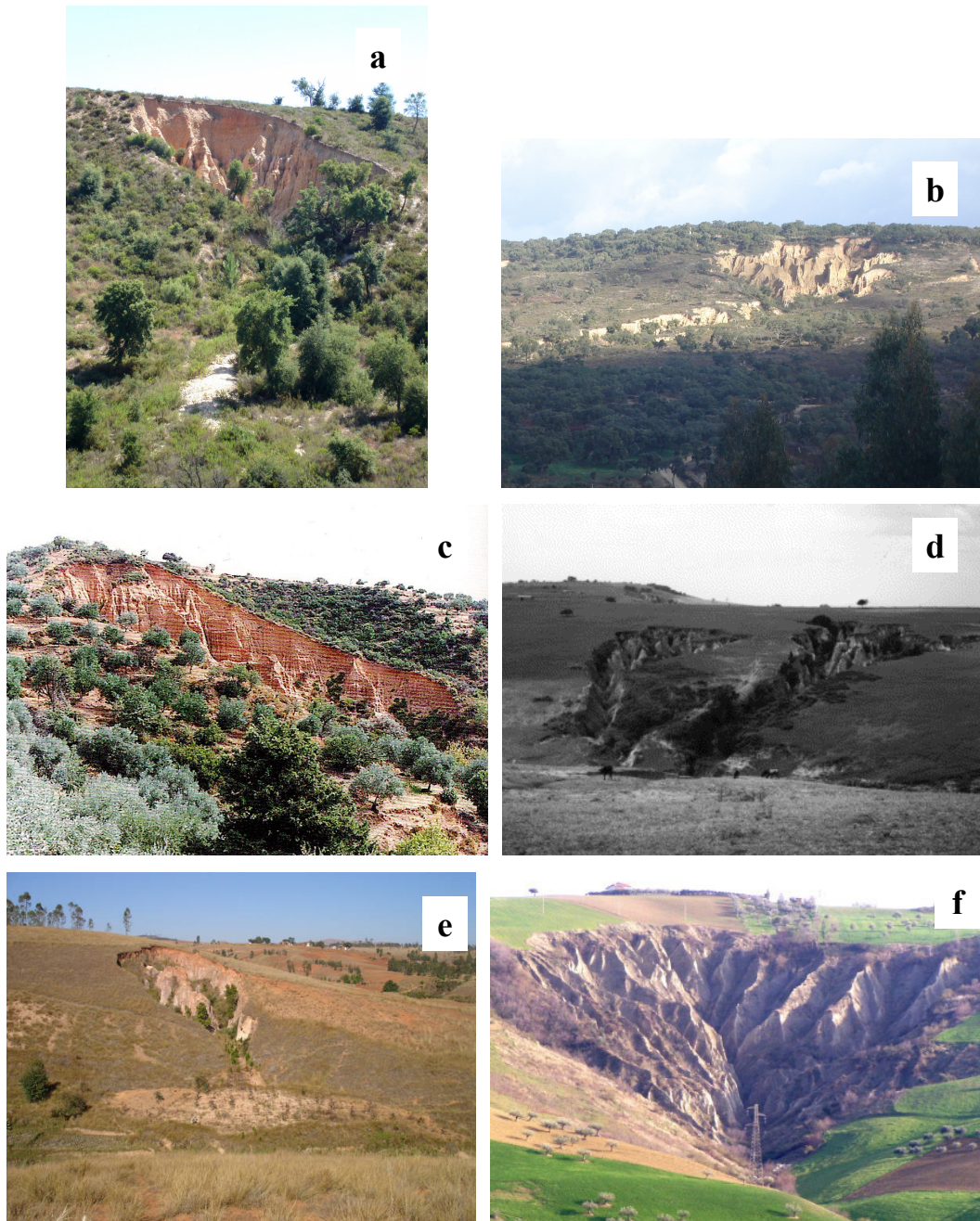


Figura 54 - Analogias morfológicas entre complexos de ravinas em diferentes contextos: (a) conglomerados e arenitos na freguesia da Ulme e (b) na freguesia do Pinheiro Grande (Chamusca); (c) areias e gravilhas em Creta (Grove e Rackam, 2001: 284); (d) saprólito granítico na Suazilândia (Morgan e Mngomezulu, 2003: 402); (e) rególito laterítico em Madagáscar³⁸; (f) materiais margosos ricos em argilas em Itália (Buccolini e Coco, 2010). Notar semelhanças com as formas de pequenas dimensões na Figura 53.

³⁸ Fotografia de Rónadh Cox, Team Lavaka image collection, Williams College. Extraído a 3/9/2011 de <http://drm.williams.edu/lavaka/>.

5. Conclusões e questões para investigação futura

A perspectiva regional que se procurou construir permitiu, com base em 55 padrões individuais de ravinamento, definir oito Padrões Gerais (PGR), designados por letras de A a H. Em função das semelhanças de dimensão e escala temporal associadas às formas, estes podem ser agrupados em dois conjuntos. Por um lado, o conjunto dos PGR A-E é marcado pela ocorrência de formas de dimensões hectométricas, ocorrendo na forma de canais organizados em rede (presentemente inactivos) e complexos de ravinas, parcialmente activos e expandindo-se essencialmente através de movimentos de massa. Estas formas estão associadas às vertentes relativamente declivosas resultantes do entalhe de cursos de água como a rib^a de Ulme ou a rib^a do Vale do Casal Velho (Chamusca) e ao recuo da superfície culminante da área de estudo. Em termos litológicos, esta superfície é constituída por materiais conglomeráticos pliocénicos, sendo as vertentes resultantes constituídas por formações arenosas e argilosas de idade miocénica a pliocénica³⁹.

As formas encontram-se actualmente desconectadas, total ou parcialmente, dos fundos de vale para onde drenam. Juntamente com esta desconexão, o avançado grau de desenvolvimento de muitas das formas e a sua actividade apenas parcial indicam que estas constituem uma fase avançada do processo de reequilíbrio do sistema morfogenético fluvial após uma ou mais fases erosivas no passado. Implicitamente, a natureza aluvionar dos fundos de vale de ordem superior e a sua morfologia aplanada evidenciam pelo menos uma fase de aluviação associada a este processo de estabilização.

O segundo conjunto de formas é constituído pelos PGR F, G e H, ocorrendo na topografia relativamente suave e dissecada pela rede de drenagem que caracteriza a parte mais meridional da área de estudo, e de que são exemplos as bacias das ribeiras de Muge, da Erra e de Sôr. As formas são sobretudo constituídas por ravinas total ou parcialmente activas, isoladas ou em rede, com profundidades decimétricas a métricas, e ocorrendo em materiais arenosos, correspondendo do ponto de vista litológico às formações arenosas e argilosas miocénicas a pliocénicas já referidas.

A localização destas formas é na sua maioria controlada pela topografia, ocorrendo em associação generalizada a usos agrícolas e florestais (sobro) que implicam a mobilização periódica do solo, e frequentemente o pisoteio por parte do gado bovino. Apenas o PGR H constitui uma excepção, ocorrendo numa única área sob floresta de eucaliptos.

³⁹ Os depósitos de terraços não são referidos em função da reduzida associação às formas estudadas.

Para além dos oito PGR referidos, a ocorrência generalizada, embora necessariamente dispersa, de ravinas activas associados a elementos antrópicos (vias de comunicação, aterros e valas de drenagem), permitiu identificar estas formas como um tema relevante para trabalhos futuros.

Face aos resultados da caracterização regional que se pretendeu levar a cabo, foi possível definir quatro conjuntos de questões para investigação futura.

(1) Qual é a cronologia do surgimento e desenvolvimento das formas de grandes dimensões (PGR A-E) e quais foram os seus factores de controlo? Especificamente, em que medida o seu desenvolvimento pode ser atribuído a factores naturais (e.g. descida do nível de base ou períodos de precipitações extremas) e/ou a influências antrópicas (e.g. desflorestação)? No caso dos complexos, poucas vezes alvo de consideração na literatura, que padrões de localização, forma e processo apresentam, e quais as seus controlos? Que taxas de evolução registam actualmente?

(2) Quais são os factores por detrás do surgimento e evolução das formas relativamente incipientes ocorrendo no sector S da área de estudo (PGR F e G)? Quais são as suas taxas de erosão presentes, e em que medida estas estão associadas ao uso do solo?

(3) Que padrões de forma e localização apresentam as ravinas associadas a elementos antrópicos? Que taxas de erosão registam, e qual é a sua resposta a episódios de precipitação de diferentes magnitudes/intensidades? Como é que a localização e características dos elementos a que se associam (e.g. estradas, terraços, valas de drenagem) podem ser optimizadas para minorar o seu surgimento sem comprometer as respectivas funções, e com que custos para os proprietários?

Para além destas questões, directamente relacionadas com os padrões definidos, as considerações teóricas levantadas suscitaram uma outra questão mais teórica e fundamental, designadamente:

(4) Para diferentes contextos ambientais e desde o surgimento de um entalhe, qual é o papel desempenhado pela morfodinâmica das cabeceiras na expansão das formas e na sua evolução para diferentes tipos de sistemas?

Os contrastes de escala espacial e temporal entre os dois conjuntos de padrões já descritos implicam que futuros estudos de pormenor sejam baseados em metodologias específicas. Como exemplos, a estereo-restituição de fotografias aéreas é adequada para a análise das grandes formas nos padrões A a E, mas não para as formas relativamente incipientes. O oposto poderia ser dito da medição manual de secções transversais no campo, adequada a canais relativamente incipientes, mas impraticável no caso dos grandes canais hectométricos.

A comparação das formas de menores dimensões (PGR F-H) com a informação utilizada para classificar a área de estudo deixou claro que futuros trabalhos de pormenor deverão fazer uso de informação de base mais detalhada em processos de modelação numérica da elevação (e, implicitamente, da acumulação do escoamento), de forma a representar adequadamente o papel da topografia e a posição das linhas de água.

Do ponto de vista temporal, a análise de fotografias aéreas antigas, as entrevistas aos proprietários e a análise de séries de dados meteorológicos poderiam ser métodos adequados ao estudo das formas relativamente recentes, mas o seu âmbito máximo de algumas décadas nunca poderia abarcar todo o potencial período de formação e evolução das formas maiores, para as quais a datação de depósitos fluviais e coluviais (e.g. por luminescência opticamente estimulada ou ^{14}C), a caracterização paleo-ambiental (e.g. através de análises palinológicas) ou o recurso a documentos históricos seriam mais adequados.

Por último, os resultados obtidos permitiram salientar duas áreas como prioritárias para estudos de pormenor. Em primeiro lugar, a bacia da rib^a de Ulme e a sua envolvente, caracterizadas pela maior concentração de grandes complexos de ravinas observada. Estes sistemas revestem-se de particular interesse não apenas por estarem relativamente pouco estudados, mas também por se encontrarem ainda em expansão. A bacia da rib^a de Ulme afigura-se igualmente prioritária no contexto específico das formas associadas a elementos antrópicos pelas condições topográficas que oferece para a sua ocorrência, possuindo maiores declives e comandos do que todos os outros principais cursos de água na área de estudo.

Em segundo lugar, pode ser definido como prioritário o sector S da área de estudo (e.g. rib^a de Muge), onde o ravinamento ocorre com maior grau de actividade e em clara associação a usos agro-florestais.

Dadas as limitações logísticas que inevitavelmente se impõem, optou-se por centrar o restante da investigação na primeira destas áreas consideradas prioritárias. Esta opção é justificada tanto num contexto prático como teórico: no contexto prático da aplicação ao ordenamento e à gestão do território, as formas em presença encontram-se ainda em evolução, apresentam-se por vezes com elevadas densidades e enormes dimensões, e impõem condicionantes dramáticas ao uso do solo, pelo que o conhecimento do seu desenvolvimento e respectivos factores de controlo se afigura bastante relevante. No contexto teórico da Geomorfologia, e como já foi salientado no Capítulo I, estas formas encontram-se muito pouco estudadas, apesar de a sua expansão e coalescência estabelecerem a transição entre os domínios do ravinamento e da geomorfologia de *badlands*. Dado que a literatura do primeiro destes campos se encontra centrada em formas simples e relativamente incipientes e a do segundo

em vastas extensões continuamente degradadas, verifica-se uma lacuna importante no conhecimento das formas intermédias, i.e. sistemas de ravinas que apresentam internamente processos típicos de *badlands*, mas evoluem ainda numa topografia não dissecada.

Para além da ribeira de Ulme, seleccionou-se para consideração como área de estudo na terceira parte do trabalho a bacia adjacente da ribeira do Vale do Casal Velho.

III

Os complexos de ravinas das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho: forma, processos, controles e dinâmica recente

III

Os complexos de ravinas das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho: forma, processos, controlos e dinâmica recente

Com base no primeiro dos conjuntos de questões para investigação definidos no fim do estudo de âmbito regional que constituiu o Capítulo II (vd. II. 5), foram delineados dois grandes objectivos para este terceiro e último capítulo do trabalho, abordados nas duas etapas sucessivas que a seguir se delineiam:

- 1) Investigar os padrões de localização, morfologia e processos apresentados pelos complexos de ravinas, bem como os respectivos controlos;
- 2) Investigar a evolução actual das formas.

Numa primeira etapa, foi construída uma amostra de 90 complexos de ravinas, sujeita a uma caracterização generalizada em termos de dimensão, morfologia e grau de desenvolvimento, e caracterizada quanto à posição no contexto das respectivas bacias e a uma série de possíveis factores de controlo. Com base na análise dos dados resultantes, procurou-se estabelecer uma caracterização generalizada das formas e da sua distribuição espacial e aferir relações com possíveis factores.

Numa segunda etapa, foi adoptada uma perspectiva de pormenor. Procurou-se investigar em detalhe a morfologia e os processos evolutivos que um conjunto de 30 destes sistemas de ravinas apresenta actualmente, bem como as relações que mantém com diferentes factores ambientais. Esta análise foi complementada com uma abordagem à sua evolução durante um período de 36 anos (1970-2006) recorrendo a estéreo-restituição fotogramétrica.

Em paralelo com os objectivos acima especificados pretendeu-se, ao articular estas duas abordagens complementares (uma generalizada, outra incidindo pormenorizadamente num conjunto mais reduzido de unidades de análise), estabelecer uma visão abrangente e ao mesmo tempo o mais detalhada possível sobre o fenómeno dos complexos de ravinas na área de estudo.

As metodologias adoptadas e os respectivos resultados serão alvo de consideração em separado, sendo primeiro realizada uma caracterização das duas bacias em estudo.

1. As ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho: um enquadramento

As bacias das ribeiras de Ulme (RU) e do Vale do Casal Velho (RVCV) (Figura 55) situam-se na margem esquerda do Tejo, sendo abrangidas na sua quase totalidade pelo município da Chamusca¹. Possuem dimensões muito contrastantes, ocupando respectivamente áreas de 138,4 e 12,9 km². A desembocadura da RU situa-se aproximadamente 2,38 km a SSE da localidade que dá o nome ao município, enquanto a RVCV tem a sua desembocadura na localidade do Pinheiro Grande, cerca de 4,64 km a NE da Chamusca. Em termos de configuração, ambas as bacias são relativamente alongadas, estendendo-se nos seus comprimentos máximos por cerca de 23,9 km num sentido W-E (RU) e por cerca de 5,7 km no sentido NW-SE (RVCV).

No que diz respeito à altitude, as duas bacias apresentam valores de altitude mínimos de 7 e 20 m (RU e RVCV respetivamente), com valores máximos de 200 e 198 m a serem atingidos nos sectores de cabeceira.

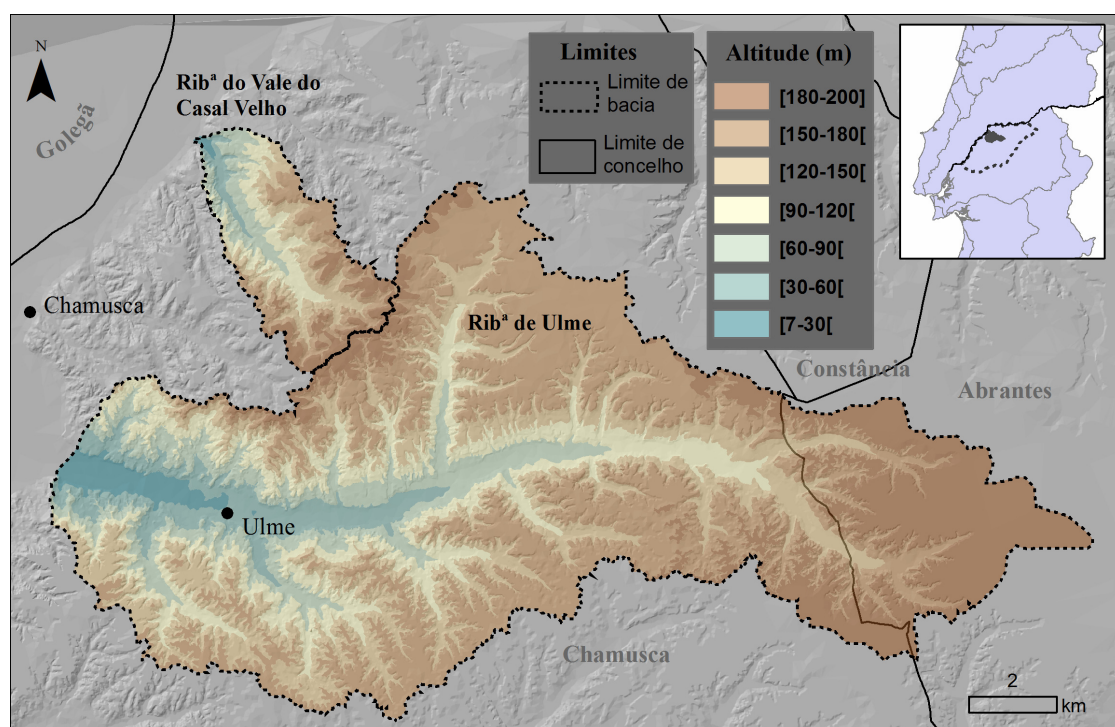


Figura 55 - Hipsometria das duas bacias em estudo e seu respectivo enquadramento face à bacia portuguesa do Tejo (mapa no cimo à direita) e à totalidade da área considerada no presente trabalho (limite a tracejado no mesmo mapa).

¹ A RVCV situa-se integralmente na Freguesia do Pinheiro Grande, e os limites da bacia da RU constituem em grande parte os limites da freguesia de Ulme, ambas integradas no município da Chamusca. No seu extremo E, porém, a bacia da RU abrange uma pequena parte da freguesia da Bemposta, já no município de Abrantes.

Procurou-se centrar esta caracterização das bacias nos factores ambientais mais relevantes para o contexto do ravinamento. No presente caso, as formas a estudar são de grandes dimensões (decamétricas a hectométricas), implicando que qualquer hipotético controlo por parte do contexto pedológico só pode ter tido lugar numa fase incipiente do desenvolvimento, quando o contraste entre a dimensão das formas e a espessura do perfil do solo era muito menos marcado. Dos vários potenciais factores de controlo, o solo pode assim ser presentemente considerado sem relevância, muito especialmente dada a natureza incipiente e superficial com que ocorre no contexto topográfico dos sistemas de ravinas estudados (Figura 56).



Figura 56 - Dois exemplos da natureza incipiente dos solos nos contextos de ocorrência dos complexos de ravinas estudados. Ambas as formas estão situadas na freguesia de Ulme.

A proximidade das duas bacias entre si, as suas dimensões relativamente reduzidas e a ausência de características topográficas contrastantes (e.g. diferenças marcadas de exposição) sugerem um contexto homogéneo em termos do regime anual da precipitação, outro potencial factor diferenciador das características dos sistemas de ravinas. O mesmo é sugerido pela análise da distribuição da precipitação anual média em Portugal (cf. Brito, 2005: 51) mostrando ambas as bacias e a sua envolvente associadas a valores na mesma classe entre os 600 e os 800 mm.

Finalmente, e numa perspectiva temporal, as grandes dimensões das formas em causa implicam períodos de desenvolvimento pelo menos multi-decais, tornando pouco relevante qualquer tentativa de encontrar relações entre a sua localização e características e as variações do uso do solo actual através das duas bacias².

² A comparação das dimensões das formas em fotografias aéreas de 2006 e de 1958 mostrou claramente que as modificações foram muito reduzidas ao longo de quase cinquenta anos, atestando a escala temporal

Excluídos o contexto pedológico, a distribuição da precipitação e o uso do solo, optou-se por centrar a descrição das bacias em estudo nos factores de controlo do ravinamento cuja acção é passível de abranger âmbitos temporais mais extensos: o contexto topográfico e a litologia.

1.1. O contexto topográfico

As bacias foram caracterizadas com respeito a quatro características topográficas: o declive, as curvaturas planares e de perfil³, e a forma das vertentes.

De modo a evitar uma generalização excessiva que pouca informação daria sobre os padrões potencialmente existentes, começou-se a análise individualizando as unidades morfológicas essenciais das bacias. Estas unidades foram depois caracterizadas separadamente quanto ao declive e a ambas as curvaturas. Por fim, procurou-se considerar a forma das vertentes através da observação de um conjunto de sectores transversais aos fundos de vale, definidos de forma equidistante desde a cabeceira até à desembocadura de cada bacia. Estes procedimentos são descritos de seguida.

As duas bacias foram analisadas visualmente com vista à individualização das suas unidades morfológicas essenciais. Utilizaram-se primeiramente as curvas de nível da topografia 1:25000 (Folhas 342, 343, 354 e 355) para criar um modelo TIN, depois convertido para *raster* (resolução 10 m) e usado como *input* para a construção de um relevo sombreado (*Hillshade*)⁴. Este foi depois conjugado com a cartografia topográfica 1:25000 (sobreposto com um nível elevado de transparência), e o resultado da conjugação dos dois temas serviu de referência visual para a delimitação de unidades através da vectorização de polígonos.

As unidades de relevo delimitadas revelaram ser (1) os fundos aplanados dos vales das linhas de água mais importantes; (2) as vertentes, relativamente declivosas e densamente entalhadas por linhas de água, frequentemente apresentando os grandes complexos de ravinas que constituem o objecto desta parte do trabalho; e (3) os topos e as áreas de planalto, relativamente aplanadas. Uma quarta unidade foi associada a sectores de dimensões variáveis e declive relativamente reduzido que ocorrem ao longo das vertentes de ambas as ribeiras, correspondendo sobretudo a níveis de terraços fluviais, e denominados genericamente como rechãs (4). Os limites de cada unidade são apresentados (juntamente com o contexto litológico nas duas bacias) na Figura 59.

relativamente alargada com que as relações face ao uso do solo teriam de ser abordadas. Dois exemplos são apresentados mais à frente na Figura 141.

³ As duas curvaturas são caracterizadas quanto à sua relevância para os processos erosivos em III.2.5.

⁴ Utilizou-se o ArcGIS 9.1. em todas as operações descritas.

Uma vez definidas as unidades, construíram-se mapas de declives e de curvaturas, com base num *raster* de altitudes resultante da conversão do TIN⁵. Observou-se, porém, que devido natureza linear inerente à estrutura TIN, a curvatura se distribuía com valores desajustados da realidade: nulos em grande parte das bacias, com valores muito elevados ou reduzidos em quebras na topografia. Optou-se assim por interpolar um novo modelo numérico de elevação usando o Algoritmo *Topo to Raster*. Devido à sua natureza polinomial, este método permite reproduzir curvatura na superfície interpolada, sendo assim possível representar topografia de modo mais realista do que ocorreria com base nas faces planas dos triângulos de um TIN⁶.

O modelo interpolado serviu de *input* à construção dos temas de declives, curvatura planar e de perfil⁷. Finalmente, estes foram analisados usando a ferramenta *Zonal Statistics* em ordem a manter os cálculos limitados a cada tipo de unidade de relevo. Uma vez que esta ferramenta não permite definir medidas de posição, extraíram-se as células de cada mapa correspondentes a cada unidade de relevo em cada bacia para um novo tema. Depois classificaram-se estes valores em cinco classes com limites equidistantes em termos de posição na distribuição, definindo assim os valores acima de 20, 40, 60 e 80% da distribuição (i.e. quintis 1 a 4). Os resultados são apresentados nas Tabelas 35 e 36.

Tabela 35 - Distribuição dos declives (°) por unidade do relevo nas duas bacias em estudo. Q1 a Q4 - Quintis 1 a 4. DP - Desvio-padrão.

Rib ^a de Ulme									
Unidade	% área da bacia	Declive (°)							
		Med	Min	Q1	Q2	Q3	Q4	Max	DP
Fundos	13,1	4,25	0,0	1,5	2,6	4,0	6,6	28,6	3,7
Rechãs	1,4	5,37	0,0	2,5	3,7	5,1	7,8	27,4	3,8
Topos/Planaltos	38,2	2,78	0,0	0,4	1,1	2,3	4,9	31,1	3,3
Vertentes	47,2	12,0	0,0	6,1	9,8	13,6	17,7	38,9	6,1
Rib ^a do Vale do Casal Velho									
Unidade	% área da bacia	Declive							
		Med	Min	Q1	Q2	Q3	Q4	Max	DP
Fundos	6,8	5,3	0,1	2,4	3,8	5,2	7,7	24,6	3,6
Rechãs	4,9	6,7	0,1	3,8	5,3	6,9	9,4	23,8	3,6
Topos/Planaltos	22,1	3,6	0,0	1,1	1,8	3,1	5,8	27,0	3,7
Vertentes	66,2	11,4	0,0	6,0	9,4	12,9	16,6	33,9	5,7

A informação nas tabelas possibilita uma ideia geral dos valores dominantes nas duas bacias. No que concerne às percentagens de área ocupada pelas unidades, o predomínio é das

⁵ Foram usadas as ferramentas *Slope* e *Curvature*.

⁶ O algoritmo de interpolação *Topo do Raster* é descrito com maior detalhe mais à frente, no contexto da interpolação de superfícies topográficas antecedentes ao surgimento de formas erosivas (vd. III.2.3.1).

⁷ As curvaturas planar e de perfil também podem ser designadas, respectivamente, de transversal e longitudinal.

vertentes, com 47,2% e 66,2% (RU e RVCV respectivamente). Em ambas as bacias a unidade seguinte em termos de expressão espacial é a das áreas de topo e de planalto (38,2 % na RU e 22,1% na RVCV), com os fundos e rechãs possuindo uma expressão reduzida.

A RU apresenta vertentes muito ligeiramente mais declivosas (12,0° face aos 11,4° da RVCV em termos médios; Tabela 35), sendo os valores mais elevados em todas as posições na distribuição consideradas. Ainda assim, os contextos de declive em ambas as bacias são bastante similares, sendo todos os valores bastante próximos entre si.

Tabela 36 - Distribuição das curvaturas planar e de perfil por unidade do relevo nas duas bacias em estudo. Valores adimensionais. Q1 a Q4 - Quintis 1 a 4. DP - Desvio-Padrão.

Rib ^a de Ulme								
Curvatura Planar								
Unidade	Med	Min	Q1	Q2	Q3	Q4	Max	DP
Fundos	-0,03	-5,46	-0,11	-0,04	-0,01	0,10	3,51	0,21
Rechãs	0,04	-3,73	-0,12	-0,02	0,08	0,23	2,62	0,31
Topos/Planaltos	-0,01	-7,82	-0,06	-0,02	0,08	0,22	4,39	0,26
Vertentes	-0,02	-9,32	-0,37	-0,10	0,11	0,45	7,98	0,64
Curvatura de Perfil								
Unidade	Med	Min	Q1	Q2	Q3	Q4	Max	DP
Fundos	0,15	-2,76	0,00	0,06	0,15	0,37	5,23	0,31
Rechãs	-0,17	-3,02	-0,38	-0,11	-0,01	0,08	2,85	0,43
Topos/Planaltos	-0,14	-5,06	-0,23	-0,08	-0,03	0,07	7,38	0,36
Vertentes	0,05	-6,29	-0,45	-0,07	0,20	0,63	7,49	0,78
Rib ^a do Vale do Casal Velho								
Curvatura Planar								
Unidade	Med	Min	Q1	Q2	Q3	Q4	Max	DP
Fundos	0,03	-2,58	-0,15	-0,05	0,02	0,11	1,58	0,21
Rechãs	0,08	-1,65	-0,12	0,02	0,12	0,30	2,11	0,32
Topos/Planaltos	0,02	-6,42	-0,08	0,00	0,07	0,18	2,77	0,22
Vertentes	-0,03	-7,41	-0,35	-0,07	0,11	0,39	4,44	0,56
Curvatura de Perfil								
Unidade	Med	Min	Q1	Q2	Q3	Q4	Max	DP
Fundos	0,22	-2,18	0,01	0,11	0,22	0,41	2,64	0,31
Rechãs	-0,15	-2,46	-0,34	-0,11	-0,02	0,10	1,95	0,40
Topos/Planaltos	-0,19	-3,96	-0,35	-0,13	-0,05	0,00	3,06	0,35
Vertentes	0,04	-4,26	-0,35	-0,07	0,10	0,42	4,71	0,63

Por oposição ao que foi descrito para as vertentes, todas as outras unidades de relevo apresentam declives ligeiramente superiores na RVCV em relação à RU, não só em termos médios mas também em todas as posições na distribuição (exceptuando os máximos absolutos). Estas diferenças não atingem nunca os 2°, sendo frequentemente inferiores a 1°.

Considerando as curvaturas, a Tabela 36 evidencia que ambas as bacias apresentam valores médios similares, tanto em termos planares como de perfil. Ao contrário do que ocorre com os declives, não há contrastes marcados entre as vertentes e as restantes unidades.

Os valores médios de curvatura nas vertentes mostram um muito ligeiro predomínio da concavidade, tanto em termos planares (valores negativos), como de perfil (valores positivos). Todos os valores são, porém, muito próximos de 0. A análise dos quantis confirma o equilíbrio entre convexidade e concavidade (tanto de perfil como planar) já que, para as vertentes em ambas as bacias, os 40% de área com valores mais baixos (Q2) apresentam curvaturas negativas, e os 40% com valores mais altos curvaturas positivas (Q3).

A consideração dos valores médios e quantis dentro de cada uma das restantes unidades de relevo também não permite definir contextos marcadamente côncavos ou convexos, e mostra que não há contrastes claros entre ambas as bacias.

Em ordem a complementar a leitura das tabelas, procurou-se aferir até que ponto as vertentes variam quanto à curvatura e ao declive ao longo do curso das duas ribeiras. Para isso, vectorizou-se uma linha ao longo do centro dos sectores de fundo (já delimitados), entre a desembocadura e a cabeceira mais a montante. Esta linha foi depois dividida em 11 segmentos de igual comprimento. Cada um dos 10 limites entre segmentos contíguos foi depois usado como referência para dividir a unidade morfológica associada às vertentes em 11 sectores, desde a cabeceira até à desembocadura de cada uma das bacias (Figura 57).

Finalmente, usou-se a ferramenta *Zonal Statistics* para obter os valores médios de declive e das duas curvaturas para cada um dos sectores (Tabela 37).

É de referir neste ponto que, numa fase inicial, procurou-se traçar perfis longitudinais nas vertentes e usar estas linhas como referência para a caracterização da topografia (por oposição a zonas definidas através de polígonos). Porém, tornou-se desde logo evidente que, devido à densidade com que as vertentes se encontram entalhadas por linhas de água, não é possível na grande maioria das duas bacias usar perfis lineares para definir formas características. Qualquer trajecto linearmente definido abrangerá necessariamente os fundos e as vertentes secundárias das muitas linhas de água que entalham as vertentes principais. Um exemplo desta irregularidade topográfica é apresentado na Figura 58.

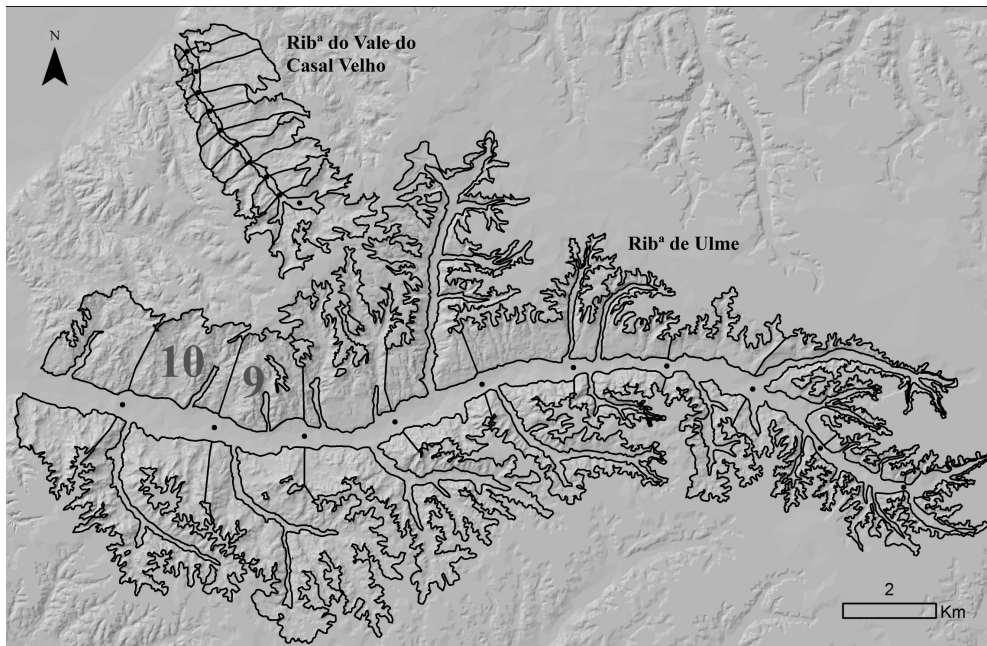


Figura 57 - Os onze sectores definidos ao longo das vertentes em cada uma das duas bacias. Os pontos visíveis ao longo dos fundos foram gerados inicialmente e serviram de referência para a sua delimitação. Os números 9 e 10 identificam os dois sectores cuja topografia interior é representada na Figura 58.

Tabela 37 - Valores médios de declive (*Dec*), curvatura planar (*Cplan*) e curvatura de perfil (*Cperf*) por sector, para as vertentes nas bacias das ribeiras de Ulme (*RU*) e do Vale do Casal Velho (*RVCV*). Sectores numerados a partir da cabeceira.

Sector	RU			RVCV		
	Dec (°)	Cplan	Cperf	Dec (°)	Cplan	Cperf
1	12,7	0,016	0,095	12,3	-0,013	0,111
2	12,9	0,002	0,140	12,2	0,001	0,077
3	12,2	0,015	0,075	11,6	0,020	0,032
4	10,5	0,020	0,077	11,9	-0,008	0,041
5	13,1	0,016	0,083	10,4	0,018	0,030
6	11,4	0,014	0,042	10,8	0,004	0,008
7	12,6	0,006	0,087	9,9	-0,009	0,029
8	11,8	0,012	0,088	11,5	0,017	0,005
9	11,1	0,018	0,050	10,1	-0,007	0,006
10	12,3	0,020	0,070	10,1	0,013	0,011
11	11,5	0,023	0,049	11,0	0,019	0,048

A análise da Tabela 37 permite observar que os valores para os três parâmetros morfológicos são da mesma ordem de magnitude em ambas as bacias, sendo as diferenças entre bacias (consideradas sector a sector) muito reduzidas. Tal como já observado para a totalidade das bacias, os declives tendem a ser ligeiramente mais elevados na rib^a de Ulme (com a única

excepção do sector 4, em que a RVCV apresenta um valor superior), mas as diferenças são na sua grande maioria inferiores a 1°. Excepções são os sectores 5 e 7 (diferença de 2,7° em cada um), 9 (1,0°) e 10 (2,2°). Tal como os declives, as duas curvaturas tendem a ser ligeiramente mais elevadas na rib^a de Ulme, sendo as diferenças entre bacias muito reduzidas.

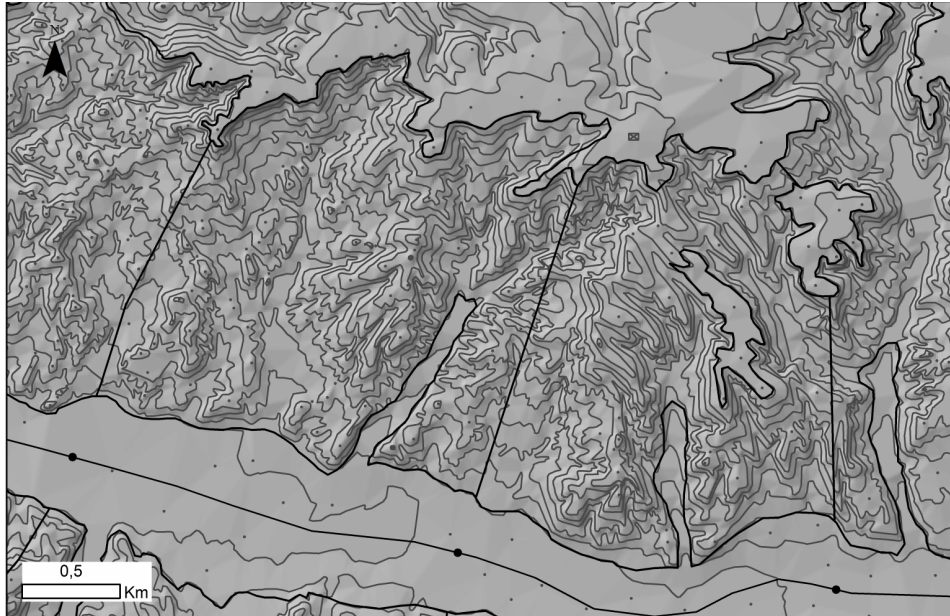


Figura 58 - Um exemplo da topografia complexa encontrada nas duas bacias. Curvas de nível da Carta Topográfica 1:25000 (equidistância 10 m) na rib^a de Ulme. Os dois polígonos delimitados representam as partes dos dos sectores 9 e 10 definidas na margem direita da ribeira (sectores são identificados na Figura 57). Ao longo do fundo, é visível a linha inicialmente vectorizada e depois dividida em 11 segmentos, estando a transição entre segmentos assinalada com pontos.

Considerando os valores de declive em cada bacia, predomina a homogeneidade. Os valores médios por sector apresentam amplitudes de variação de 2,6° (RU) e 2,4° (RVCV), com uma tendência ligeira para serem mais reduzidos nos sectores terminais, mostrando que não há contrastes marcados quanto ao declive entre sectores mais a montante e mais a jusante.

No que diz respeito às curvaturas topográficas, é desde logo evidente que todos os valores em ambas as bacias se situam muito próximo do 0 (indicando topografia plana), embora sejam na sua grande maioria positivos. O facto de esta caracterização ser baseada em valores médios permite apenas neste ponto definir que não existem, ao longo das vertentes, contextos topográficos marcadamente côncavos ou convexos⁸. A consideração dos valores de curvatura ao longo dos sectores em cada bacia não permite definir qualquer tendência de montante para jusante.

⁸ É de notar que ocorreriam valores médios de curvatura próximos de 0 se as vertentes possuíssem sectores côncavos e outros convexos, dados que os valores se anulariam mutuamente no cálculo da média. A análise das curvas de nível nos vários sectores mostrou claramente que tal não é a situação.

Em suma, a análise da topografia mostra que o contexto é essencialmente o mesmo em ambas as bacias, não havendo contrastes entre sectores mais a montante e mais a jusante no interior de cada uma.

1.2. O contexto litológico

Na caracterização quanto à litologia, utilizou-se a Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000 (folhas 27-D, Abrantes e 31-B, Chouto; Serviços Geológicos de Portugal), sendo esta informação a mais detalhada a que foi possível aceder⁹.

A Figura 59 mostra a distribuição das diferentes litologias nas duas bacias, bem como os limites das várias unidades morfológicas anteriormente descritas. A área ocupada por cada classe litológica, tanto face à totalidade de cada bacia como quanto a cada unidade do relevo e tanto em termos absolutos como percentuais, é quantificada nas Tabelas 38 e 39.

No seu todo, o contexto litológico é caracterizado pela presença de seis formações distintas, variando muitíssimo em termos de importância relativa.

A formação mais antiga corresponde, estratigraficamente, ao Miocénico-Pliocénico. É caracterizada por sucessões de areias, argilas e arenitos, intercalados com níveis de cascalho e, por vezes, conglomerados. Recebe o nome de "Complexo Argilo-Gresoso de Pederneira, Vale de Carros e Fazendas de Almeirim" na folha 31- B da Carta Geológica de Portugal (Chouto; Zbyszewski e Veiga Ferreira, 1979), e de "Formação Argilo-Arenítica dos vales de Ulme, Bemposta, etc." na folha 27-D (Abrantes; Gonçalves *et al.*, 1979)¹⁰.

É sucedida por uma formação pliocénica grosseira, que define o limite superior da coluna estratigráfica nas duas bacias. Esta formação, chamada de "Grés e Conglomerados da Serra de Almeirim" por Zbyszewski e Veiga Ferreira (1979) e simplesmente de "Arenitos e Conglomerados" por Gonçalves *et al.* (1979), define o nível culminante de toda a bacia terciária do Tejo-Sado, correspondendo sobretudo a extensos mantos de calhaus de quartzito e quartzo sub-rolados a rolados (Martins, 2004: 51), mas incluindo intercalações argilosas, areias e arenitos argilosos avermelhados e acastanhados (Gonçalves *et al.*, 1979: 29; Zbyszewski e Veiga Ferreira, 1979: 8).

Conforme é evidente pela análise da Figura 59 e das tabelas 38 e 39, estas duas litologias são as que ocupam maior extensão nas duas bacias em estudo.

⁹ A digitalização e georreferenciação destas folhas foram já descritas em II.3.2.

¹⁰ Estas formações foram relacionadas com as formações equivalentes nas restantes folhas da Carta Geológica de Portugal (escala de 1:50000) respeitantes à totalidade da área de estudo na Tabela 21 (vd.II.3.2.1).

Para além da formação mio-pliocénica, as vertentes são caracterizadas pela presença de quatro níveis de depósitos de terraços fluviais (Plistocénico), definidos na Carta Geológica entre os 8-15m (Q1), 25-40 m (Q2), 50-65m (Q3) e 75-95m (Q4). Para a presente caracterização, os vários níveis foram considerados como uma só litologia, aqui representada usando a letra Q. Estes níveis de terraços têm frequentemente expressão morfológica, introduzindo quebras na topografia das vertentes na forma de sectores com declives relativamente suaves (uma das unidades morfológicas definidas). São constituídos em geral por areias, por vezes argilosas, saibros mais ou menos grosseiros e cascalheiras, podendo conter às vezes algumas intercalações argilosas (Zbyszewski e Veiga Ferreira, 1979: 7; Gonçalves *et al.*, 1979: 25). A sua composição inclui material transportado pelas ribeiras, bem como trazido de áreas mais a montante nas vertentes, incluindo os topos definidos pelos conglomerados e arenitos pliocénicos já descritos.

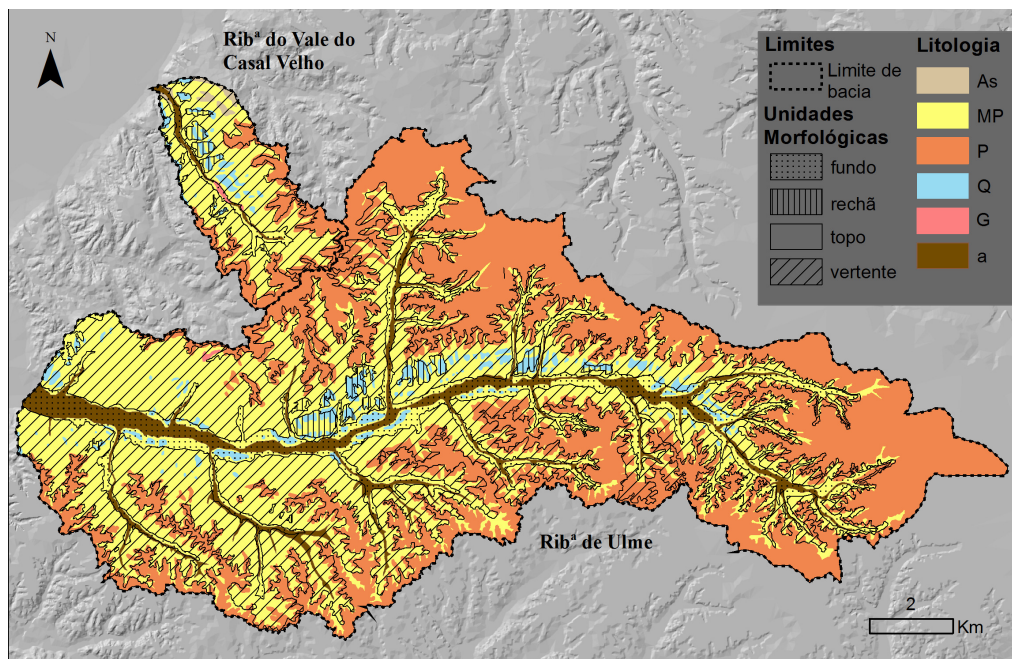


Figura 59 - Unidades morfológicas e classes de litologia nas duas bacias em estudo. Classes litológicas: (As) - Areias superficiais de vales e de terraços; (MP) - Complexo argilo-gresoso/formação argilo-arenítica; (P) - Grés e conglomerados/arenitos e conglomerados; (Q) depósitos de terraços fluviais; (G) Granitos alcalinos de duas micas, porfiróides; (a) - Aluviões.

Os materiais holocénicos são representados por duas formações: Areias superficiais de vales e de terraços (As), e Aluviões (a). A primeira tem uma expressão muito reduzida nas duas bacias, ocorrendo apenas no sector de desembocadura da ribeira do Vale do Casal Velho. É, como o nome indica, composta por areias de diferentes proveniências: trazidas e depositadas pelas cheias do Tejo (anteriores à formação dos terraços de 8-15m), provenientes de

transporte lateral por algumas linhas de água afluentes, e mesmo resultantes de transporte eólico a partir de areias fluviais depositadas em áreas mais baixas (Gonçalves *et al.*, 1979: 24). As aluviões (a) ocorrem, como seria de esperar, ao longo dos fundos das linhas de água mais importantes das duas bacias (Figura 59). Consistem essencialmente em areias, por vezes argilosas, e cascalheiras com algumas intercalações argilosas.

Tabela 38 - Área ocupada (m²) por cada uma das formações litológicas no contexto da totalidade da ribeira de Ulme, e face às respectivas unidades morfológicas. Em baixo: valores em percentagem. O significado das classes litológicas é apresentado na Figura 59.

Rib^a de Ulme						
Unidade	Área (m²)					
	a	MP	P	Q	G	
Bacia	8945431	67681087	58250470	3517292	40865	
Fundos	7523487	9520456	208796	907521	----	
Rechãs	1358	987128	3129	955145	----	
Topos	4193	6327065	46526543	51255	----	
Vertentes	1414515	50838434	11449494	1601176	40865	
Área (%)						
Bacia	6,5	48,9	42,1	2,5	0,03	
Fundos	41,4	52,4	1,1	5,0	----	
Rechãs	0,1	50,7	0,2	49,1	----	
Topos	----	12,0	87,9	0,1	----	
Vertentes	2,2	77,8	17,5	2,5	0,1	

Tabela 39 - Área ocupada (m²) por cada uma das formações litológicas no contexto da totalidade da ribeira do Vale do Casal Velho, e face às respectivas unidades morfológicas. Em baixo: valores em percentagem. O significado das classes litológicas é apresentado na Figura 59.

Rib^a do Vale do Casal Velho						
Unidade	Área (m²)					
	a	As	MP	P	Q	G
Bacia	426597	327613	7908595	3392035	805412	58344
Fundos	364011	25647	446957	----	----	47073
Rechãs	132	----	418472	618	208510	----
Topos	----	----	223039	2497408	145878	----
Vertentes	62454	301966	6820127	894009	451024	11271
Área (%)						
Bacia	3,3	2,5	61,2	26,3	6,2	0,5
Fundos	41,2	2,9	50,6	----	----	5,3
Rechãs	----	----	66,7	0,1	33,2	----
Topos	----	----	7,8	87,1	5,1	----
Vertentes	0,7	3,5	79,9	10,5	5,3	0,1

Resta referir uma última formação, cuja expressão nas duas bacias é residual. Trata-se de granitos hercínicos, alcalinos e de duas micas, porfiróides, que afloram em áreas muito

restritas ao longo do fundo da rib^a do Vale do Casal Velho e na vertente N do vale da rib^a de Ulme. São representados nas Tabelas 38 e 39 com a letra G.

A Figura 59 e as relações entre litologia e unidades morfológicas quantificadas nas duas tabelas tornam clara a associação entre topografia e litologia em ambas as bacias. As vertentes são essencialmente dominadas pelos materiais argilo-gresosos da formação mio-pliocénica (MP; 77,8% da RU; 79,9% da RVCV), enquanto os topos e planaltos são definidos pelos conglomerados¹¹ (P; 87,9% na RU; 87,1% na RVCV). Os sectores de rechã nas vertentes estão frequentemente associados a depósitos de terraços (Q), embora em muitos casos correspondam à formação mio-pliocénica (MP). Finalmente, os fundos incluem, como seria de esperar, o essencial do material aluvionar (a), embora a formação MP também tenha importante expressão nesta unidade em associação às linhas de água menos importantes ou mais a montante.

As restantes unidades litológicas (As - Areias superficiais de vales e de terraços e G - Granitos alcalinos de duas micas) não têm associação a qualquer unidade morfológica em particular, tendo uma expressão muito residual nas bacias (As só ocorre na RVCV).

2. Padrões gerais de dimensão, forma e localização: características e controlos

2.1. Aquisição dos dados

Tal como foi já descrito no início deste capítulo, a investigação centrada nas bacias das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho desenrolou-se em duas fases, pretendendo-se que estas correspondessem a perspectivas complementares sobre o ravinamento. Na primeira, procurou-se estabelecer uma caracterização generalizada dos complexos de ravinas e da sua distribuição espacial, aferindo relações com possíveis factores de controlo, e recorrendo a um conjunto relativamente alargado de unidades de análise.

¹¹ É aqui importante fazer um paralelo com os nomes das formações adoptadas na Carta Geológica de Portugal 1:500000, definidas por Barbosa (1995) e referidas por Martins (2004). De acordo com estes autores, a sedimentação nas duas bacias em estudo inicia-se no Miocénico Inferior e Médio com a formação argilosa denominada "Argilas de Tomar". Esta é seguida por um série sedimentar que se estende do Miocénico Médio ao Pliocénico, e que culmina com os Conglomerados da Serra de Almeirim, provenientes do NE da bacia do Baixo Tejo. Estes passam, para jusante (i.e. para SW) aos Arenitos de Ulme. Fazendo a correspondência entre formações, a formação MP da Carta Geológica 1:50000 abrange as Argilas de Tomar e os arenitos de Ulme, enquanto os Arenitos e Conglomerados (P) das folhas 1:50000 correspondem essencialmente aos Conglomerados da Serra de Almeirim da carta 1:500000.

Numa segunda fase, centrou-se a atenção num número menor de unidades de análise, procurando-se investigar em detalhe a morfologia e os processos evolutivos actuais das formas, bem as suas relações face a diferentes factores ambientais.

Começou-se por seleccionar uma amostra de 90 destes sistemas com base na interpretação de ortofotografias aéreas¹². Procurou-se seleccionar formas em toda a extensão das bacias, abarcando a variabilidade existente em termos de dimensão. As formas foram delimitadas por polígonos e o tema cartográfico resultante integrado numa *geodatabase*.

A partir desse conjunto inicial alargado, foram seleccionadas 30 formas, uma vez mais procurando abranger a variabilidade dimensional encontrada. Este conjunto mais restrito foi alvo de um levantamento no terreno com GPS diferencial (dGPS), sendo assim construída uma representação detalhada do perímetro de cada complexo de ravinas em termos planimétricos e altimétricos¹³. Esta informação de pormenor foi depois combinada com dados obtidos por estéreo-restituição fotogramétrica de fotografias aéreas e utilizada para caracterizar detalhadamente a morfologia dos sistemas de ravinas e analisar as suas relações com diferentes factores de controlo (Capítulo II.4).

A localização dos dois conjuntos de formas é apresentada na Figura 60.

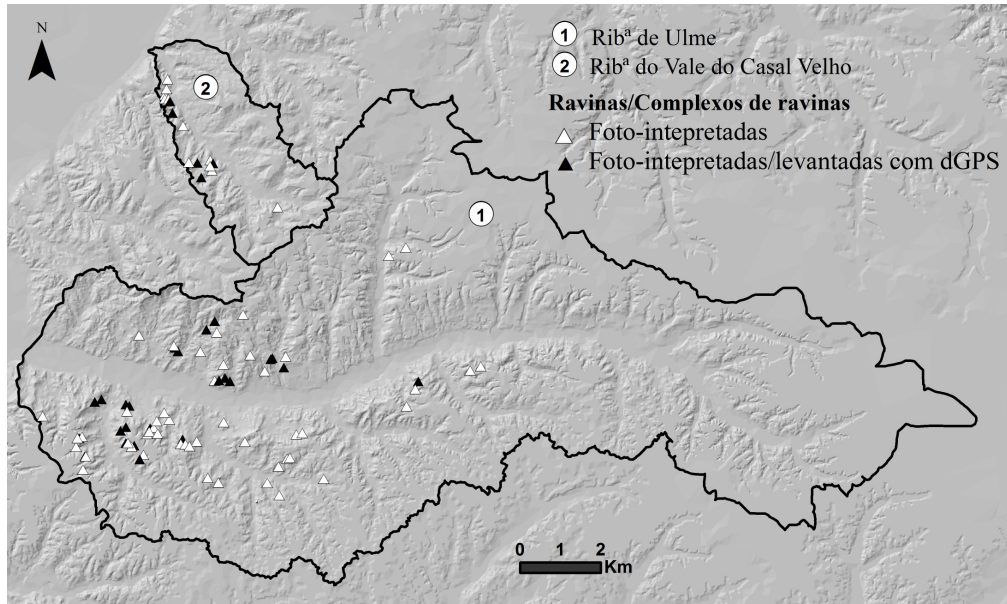


Figura 60 - Localização, no contexto das duas bacias estudadas, do conjunto de 90 formas foto-intepretadas e do sub-conjunto de 30 sujeito a um levantamento dGPS detalhado.

¹² As ortofotografias, com resolução de 0,5 m e produzidas em 2004 no contexto de uma parceria Instituto Geográfico Português/Direcção-Geral dos Recursos Florestais, foram as mesmas utilizadas no levantamento de padrões de ravinamento na totalidade da área de estudo descrito no Capítulo II.

¹³ O levantamento decorreu de Junho de 2011 a Fevereiro de 2012.

Foi utilizado no levantamento um receptor GPS Magellan Promark 3. Com o fim de maximizar a precisão das medições mantendo no mínimo o tempo dispendido em cada forma, optou-se por uma permanência de 10 segundos em cada localização, com medições a cada segundo. Os dados foram depois corrigidos com recurso ao *software* GNSS Solutions 3.00.07 (Magellan Navigation Inc.), utilizando dados da estação de Santa Margarida, parte do sistema de estações de referência GPS de funcionamento contínuo mantido pelo Instituto Geográfico do Exército, e disponibilizado à comunidade através do seu sítio digital. Após a correcção, cada forma foi analisada separadamente, e os pontos com erros maiores eliminados sempre que se considerou não condicionarem a morfologia de forma significativa, i.e. sempre que não constituíram pontos de inflexão importante ou apresentaram variações altimétricas de mais do que alguns centímetros face aos pontos anterior e posterior. Este processo envolveu necessariamente uma componente de arbitrariedade, sendo baseado na experiência das formas no campo. Os erros posicionais obtidos para os 7194 pontos resultantes são apresentados na Tabela 40, em associação a cada forma¹⁴.

Embora tivessem sido obtidos erros sub-centimétricos em muitos dos pontos medidos, um resultado do tempo de permanência relativamente elevado, foi impossível evitar erros de várias dezenas de centímetros resultantes de diferentes factores, designadamente um alinhamento desfavorável da constelação de satélites e a influência da topografia e da vegetação, muitas vezes densa e incluindo árvores, sobre a exposição do receptor ao sinal. Apesar destes erros maiores, os valores médios finais por forma, bem como os respectivos desvios-padrão, situam-se nos poucos centímetros, e a tabela mostra que, em média, 90% dos pontos por forma apresentam erros em x , y e z abaixo de 7,9, 6,8 e 15 cm respectivamente, o que pode ser considerado bastante aceitável dada a grande dimensão destas. Este nível de detalhe relativamente elevado veio complementar a informação obtida por foto-interpretação, cujo propósito foi caracterizar a posição e a dimensão de um conjunto muito mais alargado de formas, mas em termos mais gerais. Adicionalmente, as deslocações no terreno associadas ao levantamento permitiram validar por observação directa a existência de 75,6% das formas inicialmente foto-interpretadas (Tabela 41).

Com base no conjunto foto-interpretado e na cartografia topográfica 1:10000 das bacias estudadas¹⁵, cada forma foi caracterizada quanto ao perímetro, a área, a diferença entre o

¹⁴ Os erros correspondem ao erro em torno do valor da coordenada para uma margem de confiança de 95%. A título de exemplo, um erro de 0,1m para um valor de $z = 20$ m significará uma probabilidade de 95% de que o valor real se situe no intervalo definido por $20 \pm 0,1$ m.

¹⁵ A cartografia foi produzida em 2007 pela empresa Municípia, S.A., para a Comunidade Intermunicipal da Lezíria do Tejo, e gentilmente disponibilizada com autorização desta última entidade.

perímetro e o perímetro de um círculo de igual área (adoptada como indicador da sinuosidade e portanto do número de cabeceiras) e a razão entre a sua área actual e a área de drenagem medida na desembocadura da forma. Este último índice foi adoptado como um indicador do grau de desenvolvimento das formas, de acordo com a abordagem proposta por Vandekerckhove *et al.* (2000b: 40).

Tabela 40 - Erros posicionais (cm) obtidos no levantamento dGPS dos perímetros das formas. DP - desvio-padrão; P90 - percentil 90 dos valores de erro obtidos.

Código	Nº pontos (tot. 7194)	Erro X (cm)					Erro Y (cm)					Erro Z (cm)				
		Méd	Mín	Máx	DP	P90	Méd	Mín	Máx	DP	P90	Méd	Mín	Máx	DP	P90
F01	144	1,7	0,3	6,4	2,2	6,3	2,0	0,5	7,4	2,3	6,8	3,0	0,8	12,8	2,9	8,7
F02	192	3,9	0,3	9,3	3,6	8,4	2,9	0,5	9,3	2,3	5,9	6,9	0,8	21,1	6,0	14,6
F03	201	1,1	0,4	7,1	1,6	1,2	1,2	0,4	7,7	1,5	1,4	2,1	0,7	10,2	2,1	2,6
F04	71	5,1	0,4	9,9	3,2	8,8	2,8	0,6	6,1	1,7	5,5	9,5	0,9	20,6	6,3	18,5
F05	244	4,3	0,4	18,5	4,5	10,7	3,6	0,5	25,8	3,9	7,0	8,5	0,7	50,4	9,9	19,5
F06	263	1,0	0,4	12,1	1,5	0,8	1,2	0,6	9,8	1,2	1,5	2,4	1,2	18,9	2,2	3,4
F07	210	5,9	0,3	16,6	4,0	10,2	4,8	0,4	36,4	4,8	10,0	11,2	0,7	60,7	9,6	21,5
F08	451	3,4	0,3	11,3	3,4	8,2	2,5	0,4	9,9	2,3	5,4	5,7	0,8	24,6	5,2	11,6
F09	223	4,0	0,4	8,5	3,1	7,3	2,8	0,6	9,3	2,0	5,5	6,8	1,0	24,6	4,6	12,0
F10	229	5,4	0,3	20,2	4,2	10,6	4,3	0,5	25,6	4,0	8,7	10,2	1,2	59,7	10,2	18,9
F11	114	5,7	0,7	15,0	4,2	10,5	4,6	0,8	15,4	3,6	9,5	8,0	0,9	17,6	5,4	14,1
F12	309	0,8	0,5	6,3	1,0	0,7	0,9	0,5	6,8	0,8	0,9	1,6	1,0	10,6	1,3	1,6
F13	184	1,2	0,4	7,2	1,7	0,8	1,2	0,4	7,6	1,5	1,1	2,1	0,8	9,2	2,0	1,9
F14	170	4,6	0,4	13,5	4,0	9,8	3,4	0,5	14,7	3,2	7,2	9,0	1,2	29,3	7,8	18,1
F15	309	2,2	0,3	19,6	3,6	6,4	1,8	0,4	11,9	2,4	5,2	4,4	0,9	31,7	6,7	10,6
F16	106	6,9	0,7	11,0	2,6	9,7	4,8	0,8	7,2	1,7	7,0	10,3	1,1	18,5	4,4	16,5
F17	131	2,2	0,5	7,0	2,5	6,2	1,5	0,5	4,1	1,3	3,6	4,2	1,3	12,2	3,8	10,6
F18	236	8,3	0,5	18,9	4,2	14,7	6,4	0,8	29,0	5,1	13,8	19,6	1,7	61,3	12,1	36,2
F19	140	1,1	0,6	6,6	1,6	1,1	1,3	0,7	6,2	1,1	1,7	2,3	1,3	13,2	2,4	2,6
F20	273	2,2	0,3	8,5	2,9	7,7	1,8	0,6	10,2	2,0	4,2	4,1	0,8	14,5	4,5	1,3
F21	113	1,4	0,4	6,5	1,9	6,2	1,4	0,5	5,8	1,4	4,4	2,6	1,0	10,1	2,7	8,9
F22	140	2,8	0,6	14,7	4,2	11,6	2,4	0,7	11,6	2,8	7,5	6,4	1,4	40,8	9,4	25,3
F23	247	3,1	0,4	15,5	3,4	7,4	3,1	0,4	30,3	3,9	7,1	6,6	0,8	56,3	8,7	17,2
F24	218	5,1	0,4	19,1	3,8	9,5	4,7	0,5	42,0	5,6	10,4	9,4	1,0	60,2	8,2	17,3
F25	195	1,9	0,4	13,6	2,7	6,0	1,8	0,6	13,5	2,0	4,3	4,5	1,2	44,3	6,4	10,6
F26	689	4,6	0,3	12,1	3,2	7,5	3,3	0,5	18,0	2,5	6,7	7,4	0,9	27,8	4,8	11,3
F27	496	10,1	0,4	48,7	6,7	18,4	9,7	0,6	65,3	9,3	22,2	20,7	1,1	147,0	17,7	44,7
F28	95	2,3	0,4	9,8	2,8	6,0	2,1	0,5	13,1	2,8	4,0	4,3	1,0	20,0	4,8	9,9
F29	181	5,0	0,6	14,7	3,7	8,5	3,6	0,9	10,8	2,4	6,2	8,8	1,6	21,8	5,7	16,3
F30	620	8,8	0,4	34,0	4,9	15,4	9,1	0,5	39,5	7,2	18,5	19,8	1,3	78,6	15,6	42,9
Média		3,9	0,4	14,1	3,2	7,9	3,2	0,6	17,0	3,0	6,8	7,4	1,0	34,3	6,4	15,0

Como possíveis variáveis de controlo, foram determinadas a distância de cada complexo de ravinas à desembocadura da respectiva bacia (a fim de investigar possíveis relações entre as propriedades das formas e variações no nível de base), o declive e as curvaturas planar e de perfil da porção da vertente ocupada por cada forma (adoptados para representar o possível controlo por parte da topografia), a exposição e os dois índices topográficos já anteriormente

utilizados na análise regional que constituiu o Capítulo II (Índice de Potência do Escoamento e Índice Topográfico de Encharcamento; vd. II.2.1).

Pretendeu-se numa fase inicial analisar também a litologia enquanto possível variável de controlo. Porém, a análise da informação mais detalhada existente (Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000), em associação ao trabalho de campo já realizado, tornou claro que esta informação é excessivamente generalizada, fazendo em muitos casos com que as formas estejam parcialmente associadas a formações que na realidade não ocorrem, ou omitindo formações verificadas por observação directa (Figura 61). Embora esta informação tenha sido suficiente para estabelecer uma diferenciação geral entre grandes padrões de ravinamento no Capítulo II, considerou-se pouco útil para a análise mais aprofundada que aqui se pretendeu levar a cabo. Optou-se assim por considerar este possível factor de controlo apenas mais à frente, com relação às 30 formas levantadas com dGPS (a análise de maior detalhe realizada no presente trabalho; vd. III.4), e utilizando observação directa no campo e análises laboratoriais para caracterizar as unidades litológicas em cada forma.

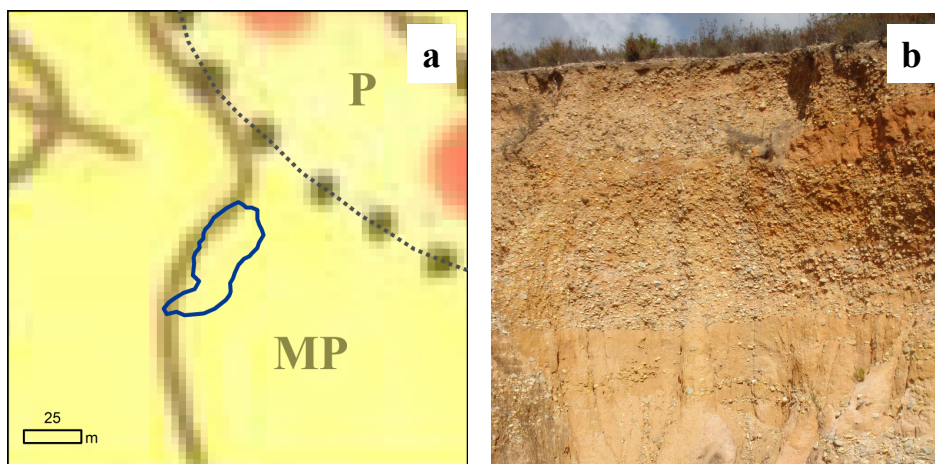


Figura 61 - Um exemplo da generalização inerente à Carta Geológica 1:50000: (a) posição na carta de um complexo de ravinhas (polígono), afastado do limite entre a formação MP e os Conglomerados (P) (vd. III.3.1.2); (b) cabeceira da mesma forma no terreno, com os conglomerados em evidência.

Dado que uma parte das formas em estudo possui dimensões suficientes para ter expressão na cartografia de base utilizada, levando a que a topografia representada seja o resultado da sua presença em vez do oposto, recorreu-se a métodos de interpolação espacial para estimar a superfície original (i.e. pré-entalhe), servindo esta superfície reconstruída de base ao cálculo das variáveis topográficas (declive e curvaturas, exposição, índices topográficos).

As metodologias utilizadas para o cálculo das diferentes variáveis e os valores resultantes são apresentados nas próximas secções.

2.2. Área e perímetro

Dimensões como a área, o perímetro ou o comprimento são variáveis elementares na caracterização de unidades de análise em geomorfologia, bem como em qualquer outro campo de estudos cujo objecto tenha uma dimensão espacial. No contexto da erosão do solo e do ravinamento em particular, as metodologias adoptadas tendem a centrar-se em três abordagens: (1) a delimitação das formas sobre fotografias aéreas (Moretti e Rodolfi, 2000; Oostwoud Wijdenes *et al.*, 2000; Parkner *et al.*, 2006, 2007) ou bases topográficas (Buccollini e Coco, 2010); (2) a sua delimitação com base em modelos numéricos de elevação obtidos mediante processos de estéreo-restituição fotogramétrica (Derose *et al.*, 1998; Martínez-Casasnovas, 2003); e (3) a sua delimitação no terreno (e.g. com GPS, estação total, ou medições manuais, e.g. Wu e Cheng, 2005; Zucca *et al.*, 2006; Romero-Diaz *et al.*, 2010). Os dados resultantes destas abordagens têm habitualmente sido processados e analisados em ambiente SIG devido à enorme facilidade de manipulação e articulação da informação possibilitada pelos numerosos *softwares* existentes. Porém, a aparente simplicidade que decorre da oferta de algoritmos para calcular estes atributos usando como *input* polígonos vectorizados leva facilmente à desconsideração do facto de que qualquer processo de representação da realidade num ambiente digital (i.e. temas cartográficos em SIG), não constitui mais do que um modelo, implicando portanto uma abstracção face à realidade e uma selecção dos seus atributos considerados úteis para o fim em vista (Mulligan e Wainwright, 2004). Neste contexto, a análise das metodologias publicadas torna claro que a delimitação de formas, sejam areais (polígonos) ou lineares sobre representações necessariamente planas de uma realidade tridimensional (i.e. topografia) não permite caracterizar as dimensões reais das formas, mas apenas a projecção dessas dimensões num plano horizontal, a que poderíamos chamar as suas dimensões aparentes. Este facto é deduzido da forma mais elementar da relação trigonométrica entre um ângulo α em graus, o seu cateto adjacente a e a hipotenusa h (Figura 62).

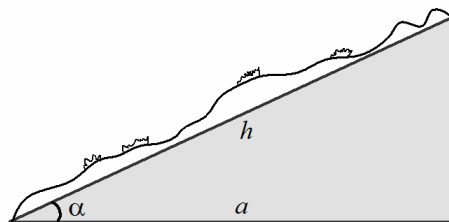


Figura 62 - Relações trigonométricas entre a hipotenusa h , representando a vertente real de declive α ao longo da qual formas hipotéticas estão situadas, e o cateto a , representando um plano horizontal sobre o qual as formas são projectadas durante o processo de vectorização.

De acordo com a figura, se:

$$a = \cos(\alpha) \cdot h$$

então,

$$h = a / \cos(\alpha)$$

o que torna implícito que quanto mais declivosa a topografia, maior a subestimação da área real resultante. A título de exemplo, uma vertente com 20 m de comprimento e 30° de declive ficaria reduzida a $\cos(30^\circ) \cdot 20$, ou 17,3 m. Se esses 20 m fossem o comprimento de um rectângulo hipotético com 5 m de largura, a área aparente seria de 86,5 m² em vez dos verdadeiros 100 m². No contexto da literatura publicada, esta sub-estimação afecta medições lineares como aquelas associadas a ravinas incipientes sobre fotografias aéreas, bem como quaisquer variáveis calculadas com base nestas (e.g. a estimativa dos volumes dos canais a partir de secções de referência conhecidas e do comprimento foto-interpretado). É de salientar que medições de comprimento realizadas manualmente no terreno (i.e. com fitas métricas ou varas graduadas, e.g. Vandekerckhove *et al.*, 2000b; Chaplot *et al.*, 2005; Zucca *et al.*, 2006;) corresponderão às dimensões verdadeiras, enquanto as mesmas formas medidas em fotografias ou com base em algoritmos planimétricos sobre pontos GPS envolverão necessariamente sub-estimação (e.g. Vandaele *et al.*, 1997; Vandekerckhove *et al.*, 2003; Bouchnak *et al.*, 2009; Kakembo *et al.*, 2009), excepto em contextos de topografia marcadamente plana (Burkard e Kostachuk, 1995).

É importante considerar que embora a área real¹⁶ seja claramente mais apropriada no contexto da caracterização das dimensões das formas, por vezes deve ser combinada com a área aparente. Ainda no contexto dos processos erosivos, este é o caso dos trabalhos em que a evolução dimensional das formas ao longo do tempo é comparada com a variação na sua área de drenagem (planimétrica), usada como um indicador da quantidade de precipitação incidente e conseqüentemente da magnitude dos escoamentos disponíveis para exercer acção geomórfica (e.g. Burkard e Kostachuk, 1997; Vandekerckhove *et al.*, 2000b).

De acordo com estas considerações, foram calculadas as áreas e os perímetros para as 90 formas vectorizadas sobre ortofotos e as 30 levantadas com GPS, levando em conta a topografia em que se inscrevem. Estes foram os valores utilizados no restante do presente trabalho. Ao mesmo tempo, porém, calcularam-se as áreas e perímetros usando metodologias convencionais (assumindo uma topografia plana, i.e. em que as coordenadas dos pontos

¹⁶ Embora a designação de "real" tenha sido adoptada para diferenciar as dimensões calculadas levando em conta a topografia das dimensões planimétricas, é importante considerar que nenhuma dimensão calculada corresponde literalmente à realidade, mas apenas a um grau de generalização desta, dependente da escala da informação altimétrica adoptada.

constituintes não têm valores altimétricos) de forma a aferir até que ponto as diferenças são significativas. Embora reconhecendo que estas considerações se desviam em alguma medida do objeto do presente trabalho, não se quis deixar de aproveitar a oportunidade possibilitada pelos dois conjuntos de dados obtidos para efectuar uma contribuição no contexto metodológico, não só para a Geomorfologia, mas também para as restantes disciplinas onde os algoritmos planimétricos referidos são prática corrente. As metodologias levadas a cabo são de seguida descritas.

2.2.1. Formas foto-interpretadas

De forma a associar valores altimétricos ao conjunto de 90 polígonos vectorizados, estes foram primeiramente convertidos num tema pontual usando a ferramenta *Features to Points* do *software* XTools 8.1. Para cada polígono, o algoritmo associado define um ponto entre cada par de segmentos de linha sucessivos, correspondendo no final ao conjunto de posições inicialmente marcadas durante o processo de vectorização sobre as ortofotos. O tema foi depois sobreposto através da ferramenta *Extract values to points* do ArcGIS 9.1 a um Modelo Numérico de Elevação (MNE) matricial com resolução de 1 m, obtido através da interpolação e posterior conversão de um modelo TIN (*Triangulated Irregular Network*), por sua vez gerado a partir da altimetria à escala 1:10000 da área de estudo. Como resultado, foi adicionado a cada um dos pontos o valor altimétrico associado à célula do MNE a que se sobrepõe.

Por fim, os conjuntos de pontos associados a cada forma (já com coordenadas verticais incluídas) foram utilizados para gerar polígonos usando a ferramenta *Make polygons from points* (XTools Pro 8.1). Estes polígonos, juntamente com os próprios pontos a partir dos quais foram gerados, foram utilizados para interpolar modelos TIN, servindo de referência para delimitar o processo de triangulação, e assim manter a configuração das formas. Os modelos resultantes foram depois convertidos para uma estrutura matricial com uma resolução de 10 cm, e esta informação utilizada como *input* para produzir um tema de declives. Com base neste tema, utilizou-se o módulo *Raster Calculator* para produzir um tema com a área real A (m²) associada a cada célula ou, de acordo com a formulação já apresentada, $A = a / \cos(\alpha)$, sendo a a área aparente (i.e. a área da célula, ou 0,01 m²), e α o declive associado à célula, em graus. A ferramenta *Zonal Statistics* foi por fim utilizada para somar as áreas reais das n células associadas a cada forma, ou formalmente,

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{0,1^2}{\text{Cos}(\alpha)}$$

As áreas planimétricas foram calculadas simplesmente como o produto entre o somatório do número de células correspondentes a cada polígono e a área aparente correspondente a cada uma (0,01 m²). Utilizou-se a mesma estrutura de dados matricial de forma a manter o processo computacional entre as duas áreas (real e aparente) o mais semelhante possível.

O cálculo dos perímetros foi realizado com base no teorema de Pitágoras. Em ordem a obter o perímetro real para cada forma, a distância d (m) entre cada par de pontos sequenciais (x, y, z) e (x', y', z') foi calculada como:

$$d = \left[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2 \right]^{0,5}$$

A formulação é ilustrada na Figura 63.

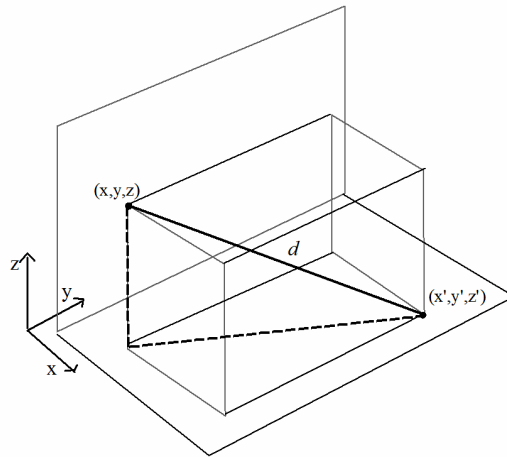


Figura 63 - Representação num referencial tridimensional da distância d entre dois pontos hipotéticos (x, y, z) e (x', y', z') , e das distâncias utilizadas para a estimar (rectas tracejadas), através da consideração de d em termos da hipotenusa de um triângulo rectângulo.

De acordo com a figura, e com todos os pontos constituintes de cada polígono ordenados de 1 a n , o perímetro total foi calculado como:

$$P = \sum_{i=1}^{n-1} \left[(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2 \right]^{0,5} + \left[(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2 \right]^{0,5}$$

O perímetro aparente foi calculado removendo simplesmente da formulação a componente associada às coordenadas verticais¹⁷.

¹⁷ A distância d entre cada par de pontos sucessivos passou assim a ser $d = \left[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 \right]^{0,5}$, donde o perímetro aparente P se converte em $\sum_{i=1}^{n-1} \left[(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{0,5} + \left[(x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 \right]^{0,5}$.

Os resultados, bem como as diferenças absolutas e relativas (em percentagem) entre valores reais e aparentes, são apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 - Dimensões reais e aparentes das 90 formas foto-interpretadas. A_r - área real; A_a - área aparente; P_r - perímetro real; P_a - perímetro aparente; A_r-A_a (%) e $P_r -P_a$ (%) representam o erro percentual relativo, i.e. a diferença entre as dimensões reais e aparentes como percentagem das reais. Valores de Código marcados com asterisco identificam formas validadas por observação directa no terreno.

Código	A_r (m^2)	A_a (m^2)	$A_r - A_a$ (m^2)	$A_r - A_a$ (%)	P_r (m)	P_a (m)	$P_r - P_a$ (m)	$P_r - P_a$ (%)
1*	324,2	278,3	45,8	14,1	85,5	76,5	9,0	10,5
2*	1126,6	963,1	163,5	14,5	164,7	150,2	14,5	8,8
3*	1703,0	1635,0	68,0	4,0	166,4	162,0	4,4	2,7
4*	196,0	152,0	44,1	22,5	56,4	49,3	7,1	12,6
5*	4433,6	4137,9	295,8	6,7	308,4	292,1	16,3	5,3
6*	1006,1	967,0	39,1	3,9	128,3	124,8	3,5	2,7
7*	2770,7	2598,2	172,5	6,2	253,1	239,8	13,2	5,2
8*	11274,1	10705,2	568,9	5,0	466,5	442,3	24,2	5,2
9*	1005,4	955,2	50,1	5,0	151,7	146,5	5,2	3,4
10*	3724,7	3396,4	328,2	8,8	298,4	276,4	22,0	7,4
11*	1241,0	1133,5	107,5	8,7	158,7	149,7	9,0	5,7
12*	1630,8	1570,1	60,7	3,7	177,2	171,5	5,7	3,2
13*	851,2	821,2	30,0	3,5	133,5	130,5	3,0	2,2
14*	607,5	571,4	36,1	5,9	103,9	99,5	4,4	4,2
15*	5136,3	4719,7	416,6	8,1	405,2	373,9	31,3	7,7
16*	743,4	662,7	80,7	10,9	107,4	101,1	6,3	5,9
17*	787,5	721,0	66,5	8,4	124,4	117,3	7,1	5,7
18*	3516,5	3352,2	164,3	4,7	254,2	246,5	7,7	3,0
19*	1285,2	1139,3	145,9	11,4	149,2	139,1	10,1	6,8
20*	2387,4	2219,3	168,1	7,0	211,5	200,7	10,8	5,1
21*	368,5	350,9	17,6	4,8	81,1	78,6	2,6	3,1
22*	777,1	698,3	78,7	10,1	126,5	117,9	8,7	6,9
23*	982,0	880,8	101,2	10,3	150,8	138,2	12,5	8,3
24*	1217,3	1050,8	166,5	13,7	198,2	179,3	18,9	9,5
25*	523,5	481,5	42,0	8,0	93,9	89,0	4,9	5,2
26*	5793,3	5622,7	170,6	2,9	447,7	436,0	11,7	2,6
27*	13060,8	12563,3	497,5	3,8	680,2	656,6	23,6	3,5
28*	210,1	191,3	18,7	8,9	60,3	56,7	3,6	5,9
29*	994,9	957,1	37,7	3,8	145,1	141,7	3,5	2,4
30*	33151,5	32022,6	1128,9	3,4	1150,3	1116,7	33,6	2,9
31*	1192,2	1110,1	82,2	6,9	172,9	164,2	8,7	5,0
32	1040,3	991,6	48,7	4,7	134,3	129,7	4,6	3,4
33*	1485,6	1390,4	95,3	6,4	216,2	204,1	12,1	5,6
34*	368,8	310,3	58,6	15,9	83,7	74,8	8,8	10,6
35*	778,4	711,8	66,6	8,6	124,4	117,7	6,7	5,4
36*	1046,8	1018,9	27,9	2,7	159,3	155,9	3,3	2,1
37*	1033,4	930,0	103,4	10,0	147,3	138,6	8,7	5,9
38*	813,2	772,4	40,8	5,0	136,8	133,3	3,5	2,6
39*	237,2	217,3	19,9	8,4	63,2	59,5	3,8	6,0
40*	554,6	511,8	42,8	7,7	101,3	94,8	6,5	6,4
41	1305,3	1153,6	151,8	11,6	196,1	182,8	13,3	6,8
42*	4077,6	3714,0	363,5	8,9	251,3	240,2	11,1	4,4
43*	413,5	347,6	65,9	15,9	87,0	78,1	8,8	10,2
44	751,1	694,4	56,7	7,5	152,8	146,8	6,0	3,9
45	994,2	879,5	114,7	11,5	134,9	126,3	8,6	6,4

Tabela 41 (cont.)

Código	Ar (m ²)	Aa (m ²)	Ar - Aa (m ²)	Ar - Aa (%)	Pr (m)	Pa (m)	Pr - Pa (m)	Pr - Pa (%)
46*	1506,2	1376,2	129,9	8,6	159,7	149,5	10,2	6,4
47*	890,3	776,6	113,7	12,8	115,2	107,0	8,2	7,1
48	515,8	474,9	40,9	7,9	87,5	83,4	4,1	4,7
49	3696,9	3580,9	116,0	3,1	271,5	267,0	4,5	1,7
50	902,4	798,0	104,4	11,6	123,2	113,1	10,1	8,2
51*	556,3	502,6	53,7	9,7	102,7	95,5	7,2	7,0
52*	2226,7	1908,4	318,3	14,3	282,6	262,9	19,8	7,0
53*	5085,6	4854,1	231,4	4,6	352,8	346,3	6,5	1,8
54	1062,5	1000,3	62,1	5,8	170,0	161,4	8,7	5,1
55	805,0	717,6	87,5	10,9	115,6	106,7	8,9	7,7
56*	976,3	901,8	74,4	7,6	162,1	154,0	8,1	5,0
57*	31106,3	29597,4	1508,9	4,9	730,5	701,8	28,7	3,9
58	1013,7	852,3	161,4	15,9	129,1	117,2	12,0	9,3
59*	2310,7	2103,0	207,6	9,0	197,2	183,5	13,7	6,9
60*	9853,0	9626,5	226,4	2,3	459,1	450,1	9,0	2,0
61*	1841,7	1667,2	174,5	9,5	210,2	195,9	14,3	6,8
62	4084,6	3735,6	349,0	8,5	289,7	278,1	11,5	4,0
63*	855,8	735,7	120,0	14,0	133,0	120,3	12,7	9,6
64*	3340,9	3202,5	138,3	4,1	276,6	267,0	9,6	3,5
65*	2050,6	1905,0	145,7	7,1	209,1	198,5	10,7	5,1
66*	2147,2	2049,5	97,7	4,6	211,2	204,9	6,3	3,0
67	1914,3	1733,8	180,5	9,4	204,7	192,0	12,7	6,2
68	2280,8	2203,4	77,4	3,4	260,1	253,2	6,9	2,7
69	1352,7	1243,8	108,9	8,1	161,7	152,5	9,1	5,7
70*	1154,7	980,2	174,5	15,1	145,2	130,4	14,7	10,1
71	845,5	782,4	63,1	7,5	156,1	144,4	11,7	7,5
72*	1458,8	1360,5	98,2	6,7	159,1	150,6	8,4	5,3
73*	2010,2	1873,5	136,8	6,8	207,2	196,2	10,9	5,3
74*	431,0	386,1	44,9	10,4	92,1	85,1	7,0	7,6
75*	2003,3	1821,6	181,8	9,1	235,6	220,1	15,5	6,6
76	2552,9	2296,8	256,0	10,0	212,7	197,9	14,8	6,9
77*	4479,8	4175,3	304,5	6,8	324,1	305,5	18,5	5,7
78*	807,2	716,8	90,4	11,2	126,9	115,0	11,9	9,4
79*	950,1	854,7	95,5	10,0	133,0	125,0	8,0	6,0
80*	5095,0	4793,9	301,1	5,9	331,4	315,4	16,0	4,8
81*	2562,8	2447,6	115,1	4,5	201,3	196,4	5,0	2,5
82	976,8	900,3	76,5	7,8	124,4	118,2	6,2	5,0
83	3278,4	3141,8	136,6	4,2	254,8	246,3	8,6	3,4
84	1093,4	1050,4	43,0	3,9	136,6	132,8	3,8	2,8
85*	207,0	193,2	13,8	6,7	65,0	62,3	2,7	4,2
86	2491,8	2347,5	144,3	5,8	232,1	220,5	11,6	5,0
87*	2009,2	1856,0	153,2	7,6	180,6	172,7	7,8	4,3
88	2296,1	2181,0	115,1	5,0	208,0	199,4	8,5	4,1
89*	3687,7	3565,3	122,5	3,3	295,1	286,6	8,6	2,9
90	606,5	569,6	36,8	6,1	104,5	99,4	5,1	4,9
Média	2692,2	2534,6	157,6	8,0	206,0	195,9	10,1	5,5
Min	196,0	152,0	13,8	2,3	56,4	49,3	2,6	1,7
Max	33151,5	32022,6	1508,9	22,5	1150,3	1116,7	33,6	12,6
DP	4972,9	4778,1	207,2	3,8	154,3	149,8	6,1	2,3
Total	242296,4	228113,2	14183,2	5,9	18541,3	17629,2	912,2	4,9

2.2.2. Formas levantadas com dGPS

Para o cálculo das áreas, os pontos associados a cada forma foram convertidos em polígonos usando a ferramenta *Make polygons from points* (XTools Pro 8.1). Este algoritmo implicou a definição manual da sequência pela qual os pontos são conectados, de maneira a reproduzir a configuração das formas observadas no campo. De seguida, e à semelhança do procedimento

adoptado para as formas foto-interpretadas, os pontos originais foram utilizados para interpolar um modelo TIN (*Triangulated Irregular Network*), sendo os polígonos utilizados como referência para delimitar o processo de triangulação e assim manter a configuração das formas. Os modelos resultantes foram depois convertidos para estrutura matricial com resolução de 10 cm, e esta informação utilizada como *input* para produzir um tema de declives, por sua vez utilizado no cálculo das áreas real e aparente segundo a formulação já apresentada com relação às formas foto-interpretadas (vd.II.2.2.1).

A mesma metodologia já descrita foi utilizada para obter os perímetros reais e aparentes.

Os resultados são comparados na Tabela 42.

2.2.3. O erro associado ao pressuposto de topografia plana: análise dos resultados

De forma a facilitar a análise, uma síntese dos resultados nas tabelas 41 e 42 é apresentada na Tabela 43.

Os valores tornam evidente que, em termos absolutos, o erro resultante da não consideração de valores altimétricos no cálculo das dimensões varia muito dentro dos conjuntos de formas analisados, particularmente no que diz respeito à área, onde a variação atinge duas ordens de magnitude em ambos os conjuntos de dados. É também importante notar desde logo que os erros percentuais relativos em termos de perímetro tendem a ser menores do que os seus correspondentes areais. Este padrão é expectável, se se considerar que o erro de uma medição areal depende exclusivamente do declive, enquanto o erro numa medição linear depende adicionalmente do ângulo entre a direcção da medição e a direcção de máximo declive da superfície topográfica. Os erros lineares serão máximos caso as medições sejam realizadas no sentido do declive máximo, e nulos caso sejam realizados numa direcção perpendicular.

Centrando a atenção nos resultados do levantamento dGPS, mais aproximado da realidade tanto em termos planimétricos como altimétricos, os erros percentuais relativos quanto à área variam entre 3,1 e 21,9%, mostrando que, no máximo, o valor calculado sem levar em conta a altimetria subestima a área real das formas em mais do que um quinto do seu valor. Em média, a subestimação por forma corresponde a pouco menos de um décimo do valor real (9,3%). Para a totalidade do conjunto de formas, o erro obtido corresponde a 5,2%, ou seja, 5524,6 m² face ao total de área levantada de 105437,1 m². No que diz respeito ao cálculo do perímetro, os valores de erro percentual relativo são apenas ligeiramente inferiores, com um máximo de 16,6% e um mínimo de 3,5% do perímetro real. O erro total é, porém, ligeiramente superior ao da área, correspondendo a 6,6% do perímetro real total estimado.

Tabela 42 - Dimensões reais e aparentes das 30 formas levantadas no terreno com dGPS. A_r - área real; A_a - área aparente; P_r - perímetro real; P_a -perímetro aparente; A_r-A_a (%) e P_r -P_a (%) representam o erro percentual relativo (diferença entre as dimensões reais e aparentes como percentagem das reais).

Código	Ar (m ²)	Aa (m ²)	Ar - Aa (m ²)	Ar - Aa (%)	Pr (m)	Pa (m)	Pr - Pa (m)	Pr - Pa (%)
F01	444,0	368,16	75,8	17,1	95,6	83,9	11,7	12,2
F02	1351,3	1222,38	128,9	9,5	201,2	185,7	15,5	7,7
F03	1585,3	1502,56	82,7	5,2	193,4	185,1	8,3	4,3
F04	255,0	199,13	55,8	21,9	68,8	57,4	11,4	16,6
F05	4482,4	4116,32	366,0	8,2	327,6	303,9	23,7	7,2
F06	1041,5	931,73	109,8	10,5	163,0	148,9	14,1	8,6
F07	2866,3	2669,84	196,5	6,9	274,5	254,3	20,2	7,4
F08	11227,2	10776,1	451,1	4,0	485,0	463,1	21,9	4,5
F09	1104,8	999,62	105,2	9,5	214,7	199,0	15,7	7,3
F10	3690,2	3475,87	214,3	5,8	306,1	291,3	14,8	4,8
F11	729,3	651,28	78,0	10,7	128,9	117,4	11,5	8,9
F12	2163,1	2073,77	89,4	4,1	262,5	253,2	9,3	3,5
F13	993,9	935,69	58,2	5,9	156,9	149,4	7,5	4,8
F14	948,6	863,29	85,3	9,0	198,4	180,2	18,2	9,2
F15	4881,0	4580,32	300,7	6,2	366,8	347,9	18,9	5,2
F16	986,4	817,41	169,0	17,1	132,0	117,1	14,9	11,3
F17	745,0	672,88	72,1	9,7	131,7	117,5	14,2	10,7
F18	3867,8	3529,39	338,4	8,8	309,2	278,8	30,4	9,8
F19	1361,5	1191,04	170,5	12,5	158,5	146,0	12,5	7,9
F20	2438,1	2310,24	127,8	5,2	237,8	223,8	14,0	5,9
F21	467,4	387,53	79,8	17,1	102,8	89,7	13,1	12,8
F22	636,8	544,53	92,2	14,5	130,1	113,0	17,1	13,1
F23	1175,8	1067,75	108,1	9,2	214,2	198,4	15,8	7,4
F24	1276,2	1141,94	134,3	10,5	209,1	191,2	17,9	8,5
F25	589,1	538,34	50,8	8,6	118,7	107,2	11,5	9,7
F26	5533,8	5326,57	207,2	3,7	711,9	667,4	44,5	6,2
F27	14000,0	13538,5	461,5	3,3	894,9	841,1	53,8	6,0
F28	232,8	196,41	36,4	15,6	67,9	59,5	8,4	12,4
F29	984,1	930,48	53,6	5,4	145,5	136,9	8,6	5,9
F30	33378,4	32353,5	1024,9	3,1	1394,5	1341,1	53,4	3,8
Média	3514,6	3330,4	184,2	9,3	280,1	261,6	18,4	8,1
Min	232,8	196,4	36,4	3,1	67,9	57,4	7,5	3,5
Max	33378,4	32353,5	1024,9	21,9	1394,5	1341,1	53,8	16,6
DP	6338,4301	6152,2	193,8	4,7	272,5	261,8	11,8	3,1
Total	105437,1	99912,5	5524,6	5,2	8402,2	7849,5	552,7	6,6

Tabela 43 - Síntese das diferenças entre dimensões reais (Ar - área real; Pr - perímetro real) e aparentes (Aa e Pa) para as 30 formas levantadas com dGPS e as 90 formas vectorizadas a partir de ortofotos (altimetrias obtidas a partir da topografia 1:10000).

	Média	Mín	Max	DP	Total
dGPS (n=30)					
Ar-Aa (m ²)	184,2	36,4	1024,9	193,8	5524,6
Ar-Aa (%)	9,3	3,1	21,9	4,7	5,2
Pr-Pa (m)	18,4	7,5	53,8	11,8	552,7
Pr-Pa (%)	8,1	3,5	16,6	3,1	6,6
Orto (n=90)					
Ar-Aa (m ²)	157,6	13,8	1508,9	207,2	14183,2
Ar-Aa (%)	8,0	2,3	22,5	3,8	5,9
Pr-Pa (m)	10,1	2,6	33,6	6,1	912,2
Pr-Pa (%)	5,5	1,7	12,6	2,3	4,9

A comparação destes valores com os resultados da foto-interpretação evidencia duas situações diferentes. Os erros percentuais relativos médios em termos de área são muito semelhantes (9,3% e 8%), não sendo possível diferenciar estatisticamente as médias das duas séries com uma probabilidade de erro (p) inferior a 0,20 (teste t^{18}). Em contraste, a diferença entre os valores médios de erro para os perímetros (8,1% e 5,5%, respectivamente para os valores dGPS e foto-interpretados) revelou-se muito significativamente diferente ($p < 0,01$).

A variação do erro percentual relativo ao longo das duas distribuições de formas é apresentada na Figura 64, sendo clara a tendência para a ocorrência de valores superiores para as formas levantadas com dGPS. Destas, aproximadamente 33% apresentam erros acima de 10% na área, face a cerca de 27% das formas foto-interpretadas. No caso do perímetro, cerca de 23% das formas levantadas apresentam erros superiores a um décimo da dimensão real, em contraste marcado com apenas cerca de 6% das formas foto-interpretadas. É evidente o maior contraste entre os erros quanto ao perímetro obtidos com as duas metodologias, em conformidade com a significação estatística das suas diferenças.

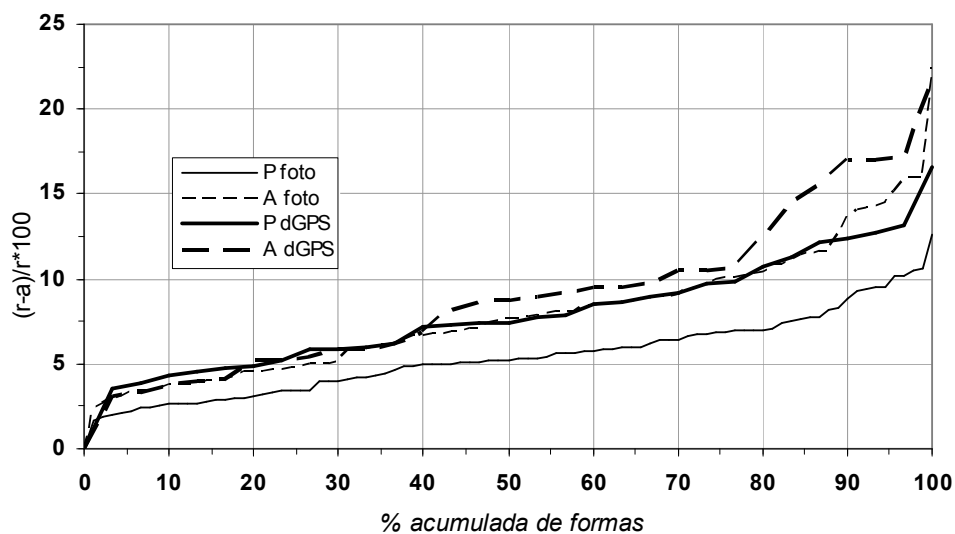


Figura 64 - Distribuição do erro percentual relativo (diferença entre valores reais r e aparentes a como percentagem dos reais) para os conjuntos de 30 formas levantadas com dGPS e 90 foto-interpretadas. Formas organizadas por ordem crescente de erro. P - perímetro; A - área.

¹⁸ Foi usado o *software* Statistica 6.0. Ambas as assunções do teste foram verificadas para os dados dGPS e foto-interpretados, designadamente a normalidade (teste de Kolmogorov-Smirnov, $p > 0,20$ para ambas as séries) e homogeneidade das variâncias (teste de Levene, $p = 0,14$) (Hill e Lewicki, 2006: 25).

Embora os resultados obtidos permitam ter uma boa noção dos erros relativos originados pela desconsideração da altitude na estimação de dimensões usando duas metodologias amplamente adoptadas na literatura, não permitem determinar as diferenças no erro resultantes especificamente da escala da informação topográfica de base adoptada. Embora as diferenças no erro percentual relativo face aos perímetros sejam muito significativamente diferentes em termos estatísticos, há vários factores exteriores à escala da altimetria que contribuem para essa diferença. Em primeiro lugar, o número muito superior de pontos por forma¹⁹ origina perímetros mais irregulares, e portanto com comprimentos totais superiores. As diferenças na configuração dos polígonos, por sua vez, levam a que as células do tema de declives abrangidas por cada polígono durante o processo de cálculo da área não sejam idênticas. Adicionalmente, a foto-interpretação (aqui realizada sem estereoscopia) é condicionada em muito maior grau pela presença de vegetação do que os levantamentos de campo, efeito particularmente marcado na área de estudo devido à colonização sistemática dos sectores jusante das formas e que promove a subestimação das dimensões, contribuindo novamente para as diferenças entre polígonos dGPS e foto-interpretados.

De forma a procurar isolar o efeito da escala da informação altimétrica de base no cálculo das dimensões, optou-se por associar um mesmo conjunto de polígonos a coordenadas verticais extraídas de fontes com escalas distintas. Para isso, removeram-se as coordenadas verticais dos pontos associados às 30 formas levantadas com dGPS. Estes foram depois sobrepostos ao modelo numérico de elevação construído a partir da topografia 1:10000 e já referido, e a um modelo adicional construído de forma idêntica (criação de um TIN e conversão para *raster*) a partir de topografia 1:25000²⁰. Foi utilizada a mesma metodologia já acima descrita (em associação aos polígonos foto-interpretados) em ordem a associar coordenadas verticais a cada ponto e calcular valores de área e perímetro levando em conta a altimetria. Os resultados, comparando os erros obtidos para os mesmos 30 polígonos e três fontes altimétricas distintas, estão sintetizados nas tabelas 44 e 45 e na Figura 65.

¹⁹ A título de exemplo, foram levantados 689 pontos dGPS no campo para a forma F26 (Tabela 40), em oposição aos 69 pontos utilizados para a delimitar durante a foto-interpretação.

²⁰ Folhas 342 e 354 da Carta Militar de Portugal, Instituto Geográfico do Exército.

Tabela 44 - Valores de erro relativo e absoluto resultantes da assunção de topografia plana adotando como fontes de altimetria os dados dGPS e a cartografia topográfica 1:10000 e 1:25000. Valores em porcentagem indicam as diferenças entre os valores reais (i.e. incluindo altimetria) e aparentes, vistas como porcentagem dos valores reais. Os valores dGPS também são mostrados na Tabela 43, sendo aqui incluídos apenas para facilitar a comparação.

	Média	Mín	Max	DP	Total
dGPS					
Ar-Aa (m ²)	184,2	36,4	1024,9	193,8	5524,6
Ar-Aa (%)	9,3	3,1	21,9	4,7	5,2
Pr-Pa (m)	18,4	7,5	53,8	11,8	552,7
Pr-Pa (%)	8,1	3,5	16,6	3,1	6,6
Topo 1:10000					
Ar-Aa (m ²)	194,2	18,5	1302,1	256,3	5827,5
Ar-Aa (%)	7,8	3,3	21,2	4,0	5,5
Pr-Pa (m)	18,7	4,3	62,1	14,7	561,5
Pr-Pa (%)	7,5	2,8	15,3	3,1	6,7
Topo 1:25000					
Ar-Aa (m ²)	179,6	22,4	1201,0	245,8	5389,2
Ar-Aa (%)	6,9	1,7	11,5	2,7	5,1
Pr-Pa (m)	15,8	4,8	55,8	12,3	473,6
Pr-Pa (%)	6,5	2,2	11,7	2,5	5,7

Tabela 45 - Resultados do teste *t* em ordem a averiguar as diferenças entre os valores de erro percentual relativo para o mesmo conjunto de 30 formas usando informação altimétrica obtida com dGPS e cartografias topográficas 1:10000 e 1:25000. P - perímetro; A - área. Valores correspondem ao *p-value*, ou seja, a probabilidade de erro associada à rejeição da hipótese nula (i.e. valores provêm da mesma distribuição). Todas as distribuições podem ser consideradas normais (teste Kolmogorov-Smirnov, $p > 0,20$ em todos os casos). Valores considerados significativos ($< 0,05$) estão a negrito.

		1:10000		1:25000		dGPS	
		A	P	A	P	A	P
1:10000	A			0,32		0,21	
	P				0,21		0,44
1:25000	A					0,02	
	P						0,04
dGPS	A						
	P						

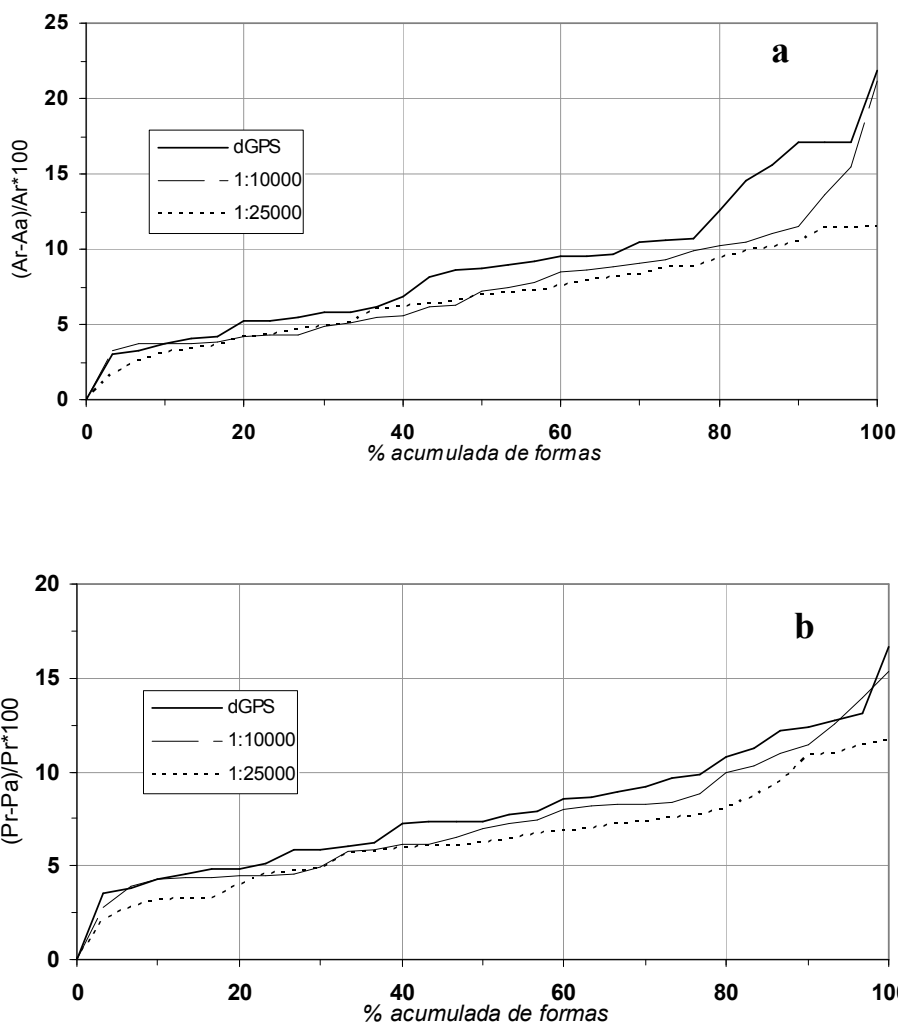


Figura 65 - Distribuições do erro percentual relativo para o mesmo conjunto de 30 formas levantadas com dGPS, usando alternativamente os valores altimétricos levantados e cartografias topográficas de escalas 1:10000 e 1:25000. (a) área; (b) perímetro.

Os valores na Tabela 44 confirmam os erros percentuais relativos mais elevados para os dados dGPS, seguidos da informação de escala 1:10000 e, por último, 1:25000. A Figura 65 torna evidente a posição intermédia dos erros associados à escala 1:10000 face aos dados dGPS e à informação 1:25000. Os testes de significação estatística realizados (Tabela 45) mostram que não é possível diferenciar os valores 1:10000 de nenhuma das outras duas séries, embora haja uma diferença significativa entre os dados dGPS e os resultados da altimetria 1:25000. É de notar que, ao contrário dos dois primeiros conjuntos de dados analisados (30 formas dGPS vs. 90 formas com altimetria de fonte 1:10000; valores na Tabela 43), não é possível, usando o mesmo conjunto de polígonos, diferenciar os erros percentuais relativos associados aos perímetros dGPS e 1:10000, confirmando a diferença anteriormente encontrada como um

resultado da muito maior sinuosidade (resultante do maior número de pontos) dos polígonos dGPS face àqueles foto-interpretados.

As análises realizadas até este ponto permitiram chegar a várias conclusões no que concerne à relevância da inclusão de valores altimétricos no cálculo de áreas e perímetros. Em primeiro lugar, e no que diz respeito à caracterização dos erros relativos expectáveis utilizando metodologias habituais na literatura, a comparação dos resultados obtidos com levantamento dGPS e foto-interpretação (Tabela 43) mostra que o erro médio corresponde a uma subestimação da ordem dos 8 a 9% na área real das formas, não obstante a quantidade de pontos que constitui cada polígono analisado. No caso dos perímetros, e assumindo formas igualmente irregulares, o erro será tão mais relevante quanto maior a quantidade de pontos por forma. Esta relação é confirmada pelo facto de, para os dados foto-interpretados à escala 1:10000 (relativamente poucos pontos por forma), a subestimação média estar bastante abaixo daquela associada aos dados dGPS (5,5% por oposição a 8,1%), enquanto com densidades de pontos semelhantes não é possível diferenciar estatisticamente as duas médias (7,5% e 8,1%) (Tabela 45).

Em segundo lugar, a análise das associações entre a mesma amostra de polígonos e dados altimétricos de diferentes escalas permitiu observar que a subestimação das dimensões reais aumenta com a escala da informação adoptada. Por outras palavras, para polígonos com complexidade (i.e. número de pontos) semelhante, a inclusão do declive na caracterização dimensional das formas será mais relevante face à adopção de dados altimétricos detalhados (GPS ou de escala 1:10000) do que face à utilização de altimetria de base a escalas menores (e.g. 1:25000, 1:50000).

Tal como o erro percentual relativo médio, os resultados sugerem que a variabilidade do erro ao longo das distribuições também aumenta com a escala da altimetria. A Tabela 44 mostra um aumento do desvio-padrão com a escala da informação, bem como uma tendência para o aumento dos valores extremos, tanto em termos de perímetro como de área. Neste contexto, é relevante notar que o erro percentual relativo máximo de área obtido para os dados dGPS e a altimetria 1:10000 foi aproximadamente o dobro daquele associado à informação 1:25000.

Por último, os resultados na Figura 65 deixam claro que a proporção de formas com erros elevados também aumenta com o aumento da escala da informação. Assumindo um valor de subestimação face às dimensões reais de 10% como significativo, a figura mostra que este limiar caracteriza um terço (33,3%) das formas levantadas com dGPS e um quinto (23,3%) das formas de altimetria 1:10000, contrastando com apenas 16,7% das formas de altimetria

1:25000. No caso dos perímetros, as proporções de subestimações superiores a 10% serão, respectivamente, de 23,3% (dGPS e 1:10000) e 13,3% (1:25000).

É evidente que os valores de erro obtidos estão associados ao contexto topográfico da área de estudo, podendo variar grandemente em outros locais. De acordo com as formulações já apresentadas, as subestimações resultantes da assunção de topografia plana são proporcionais aos declives das superfícies onde as formas ocorrem. No contexto específico do ravinamento, estes erros afectam não apenas os valores de área, perímetro ou comprimento, mas também o estabelecimento posterior de relações quantitativas entre variáveis. Exemplos são as já referidas relações entre área de drenagem planimétrica (representando correctamente a quantidade de escoamento disponível para erodir) e o crescimento das formas ao longo do tempo (Parkner *et al.*, 2006, 2007), ou o cálculo de volumes com base em secções de canais medidas no campo e o comprimento dos canais, foto-intepretado (e.g. Bouchnak *et al.*, 2009) ou medido com GPS (e.g. Hancock e Evans, 2006). Estes erros tenderão a ser particularmente prejudiciais em estudos centrados em áreas com topografia muito contrastada, já que em contextos de relevo relativamente constante o erro tenderá a ser igualmente homogéneo.

Por último, é importante notar que a medida de erro adoptada (erro percentual relativo) pretende quantificar a subestimação originada pela não consideração do declive nos cálculos de área e perímetro tendo como referência cada escala de informação altimétrica adoptada. A adopção de uma escala como referência implica a assunção de que a informação topográfica utilizada é verdadeira: é evidente, porém, que apesar dos diferentes graus de generalização, nenhum dos conjuntos de dados corresponde totalmente à realidade.

Em conclusão, considerou-se que à luz dos resultados obtidos, a inclusão de valores de declive nas metodologias de cálculo das dimensões se afigura como bastante relevante. As análises realizadas tornaram claro que a assunção de topografia plana inerente ao cálculo de áreas, perímetros e comprimentos usando exclusivamente valores planimétricos constitui uma fonte constante de perda de objectividade, agravada não só pelo carácter variável do erro (variando com o declive ao longo de cada área de estudo, e entre diferentes áreas) como pela sua propagação em análises posteriores, face às quais os valores com diferentes graus de subestimação constituem variáveis de entrada.

Finalmente, procurou-se estabelecer uma ligação entre as considerações tecidas e a literatura publicada no campo do ravinamento, aferindo em que medida subestimações semelhantes às encontradas no presente trabalho podem ser esperadas em outros contextos geográficos. Para isso, realizou-se uma breve revisão bibliográfica, estimando-se, com base nas caracterizações dos declives para diferentes áreas de estudo, os erros expectáveis. Os cálculos basearam-se na

formulação apresentada no início do capítulo. Assumiu-se uma unidade espacial arbitrária de 1m^2 como área aparente (aa). Tendo um valor de declive (α), determinou-se a área real (ar) como,

$$aa/\cos(\alpha)$$

Sabendo ar e aa , calculou-se o erro percentual relativo como,

$$(ar-aa)/ar \times 100$$

Estes cálculos foram realizados para os valores médios de declive descritos nos vários trabalhos revistos, bem como para os máximos e mínimos (quando apresentados). Tal como já foi referido, os erros nas medições lineares variam consoante a orientação da medição em relação ao declive, pelo que, à semelhança do que ocorreu com os dados analisados, podem assumir-se como menores do que os erros areais.

Os resultados são apresentados na Tabela 46 e mostram que, embora relativamente elevados, os erros obtidos não são infrequentes. Mesmo em contextos de topografia relativamente suave, os valores máximos de subestimação podem facilmente exceder os 10% das dimensões reais. A perda de objectividade resultante afectará não apenas cada estudo em particular, mas também as comparações entre resultados obtidos em diferentes áreas.

Tabela 46 - Alguns exemplos de contextos topográficos extraídos da literatura, e o erro percentual relativo estimado (Ar-Aa (%)) como função do declive.

Autores	Localização	Declives (°)	Ar-Aa (%)
Vandekerckhove <i>et al.</i> (2000b)	SE Espanha	Mín: 1,3; Méd: 13,8; Máx: 49,1	Mín: 0,03; Méd: 2,89; Máx: 34,53
Meyer & Martínez-casasnovas (1999)	NE Espanha	Méd: 5,25	Méd: 0,42
Menéndez-Duarte <i>et al.</i> (2007)	NW Espanha	Méd: 23 (canais profundos); 25 (canais superficiais)	Méd: 7,95 (canais profundos); 9,37 (canais superficiais)
Buccollini <i>et al.</i> (2012)	Sicília	Mín: 22,2; Máx: 50,6	Mín: 7,41; Máx: 36,53
Buccollini & Coco (2010)	Itália Central	Mín: 9; Máx: 30	Mín: 1,23; Máx: 13,40
Nachtergaele <i>et al.</i> (2001b)	Bélgica Central	Méd: 3,0	Méd: 0,14
Nachtergaele <i>et al.</i> (2001)	S Portugal	Méd: 7,1	Méd: 0,77
Vandekerckhove <i>et al.</i> (1998)	N Portugal	Mín: 2,6; Máx: 17,6	Mín: 0,10; Máx: 4,68
Boardman (1992) ¹	SE Inglaterra	Mín: 1,75; Máx: 11,6	Mín: 0,05; Máx: 2,04
Hyde <i>et al.</i> (2007)	W Montana (EUA)	Méd: 22,6	Méd: 7,68
Patton & Schumm (1975) ¹	Colorado (EUA)	Mín: 0,6; Máx: 3,2	Mín: 0,01; Máx: 0,16
Ebisemiju & Ekiti (1989)	W Guiana	Mín: 3; Máx: 30	Mín: 0,14; Máx: 13,40
Morgan & Mngomezulu (2003)	Swazilândia Central	Méd: 9,6	Méd: 1,40
Muñoz-Robles <i>et al.</i> (2010)	SE Austrália	Méd: 14,6	Méd: 3,23
Hancock & Evans (2006)	N Austrália	Mín: 0,9; Máx: 27,7	Mín: 0,01; Máx: 11,46
Parkner <i>et al.</i> (2006)	N Nova Zelândia	Mín: 15,6; Máx: 29,2	Mín: 3,68; Máx: 12,71
Wu & Cheng (2005)	N China	Mín: 15,4; Méd: 24,8; Máx: 39,0	Mín: 3,59; Méd: 9,22; Máx: 22,29
Chaplot <i>et al.</i> (2005)	N Laos	Méd: 28,4	Méd: 12,04

¹ Conforme citado em Vandaele *et al.* (1996)

2.3. Sinuosidade

Procurou-se construir um indicador para caracterizar cada forma quanto à sinuosidade. Para tal, foi estimada a diferença entre o perímetro de cada forma e o perímetro de um círculo de área equivalente à da forma²¹. Usou-se o círculo como referência em função da sinuosidade mínima com que a sua circunferência envolve a área interior. Pretendeu-se assim aferir até que ponto o perímetro dos sistemas de ravinas se torna mais ou menos sinuoso com o aumento da área, indiciando respectivamente o desenvolvimento de múltiplas cabeceiras ou, pelo contrário, a coalescência daquelas existentes numa forma de contornos regulares. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 47.

2.4. Distância à desembocadura

A síntese regional realizada no Capítulo II permitiu enquadrar os padrões gerais de ravinamento encontrados ao longo de uma sequência hipotética de desenvolvimento, estruturada pelo entalhe e alargamento da rede hidrográfica durante o Plistocénico. Foi salientado que embora a evolução dos vales, com especial relevância para o da rib^a de Ulme, tenha sido um factor necessário para a exposição das extensões relativamente declivosas de arenitos e argilas onde hoje as formas se desenvolvem, tal não implica que tenha sido o factor crítico no seu surgimento, tendo sido apontados outros factores de controlo potenciais (vd. II.4.1.1).

Pretendeu-se aferir até que ponto existe uma relação entre as características das formas e a sua distância à desembocadura das respectivas bacias, sendo que tal indicaria um controlo directo por parte do nível de base sobre o seu desenvolvimento. Assumindo o entalhe do Tejo durante o Plistocénico como factor crítico e todos os restantes factores potenciais (e.g. declive, forma das vertentes, litologia) como invariantes, seria de esperar que as formas de maiores dimensões se localizassem mais próximo da desembocadura das bacias, ponto de partida para a erosão regressiva necessária ao entalhe e expansão da rede de drenagem. Descidas do nível de base têm sido frequentemente associadas na literatura ao desenvolvimento de ravinas e de áreas de *badlands* (Wells e Gutiérrez, 1982; Grove e Rackam, 2001: 27; Mather *et al.*, 2002; Harvey, 2004: 47; Alexander *et al.*, 2008: 84).

²¹ O indicador foi calculado da seguinte forma: sendo a área a de um círculo $\pi.r^2$, o respectivo raio será $(a/\pi)^{0.5}$. Dado que o perímetro P_{circ} de um círculo é dado por $2.\pi.r$, para uma forma de área Ar , $Pr-P_{circ}$ será dado por $Pr-2\pi.(Ar/\pi)^{0.5}$.

Tabela 47 - Valores obtidos para a diferença entre o perímetro real de cada forma (Pr) e o perímetro de um círculo de igual área (Pcirc), enquanto indicador de sinuosidade.

Código	Pr-Pcirc (m)	Código	Pr-Pcirc (m)
1	21,66	46	22,10
2	45,73	47	9,43
3	20,11	48	7,00
4	6,78	49	56,01
5	72,37	50	16,70
6	15,87	51	19,05
7	66,46	52	115,36
8	90,12	53	100,00
9	39,25	54	54,48
10	82,07	55	15,02
11	33,80	56	51,29
12	34,02	57	105,31
13	30,06	58	16,29
14	16,56	59	26,79
15	151,19	60	107,24
16	10,77	61	58,08
17	24,97	62	63,10
18	43,96	63	29,29
19	22,08	64	71,74
20	38,28	65	48,60
21	13,09	66	46,95
22	27,71	67	49,56
23	39,70	68	90,84
24	74,53	69	31,30
25	12,82	70	24,72
26	177,89	71	53,06
27	275,06	72	23,66
28	8,94	73	48,25
29	33,34	74	18,54
30	504,87	75	76,91
31	50,48	76	33,58
32	19,94	77	86,80
33	79,60	78	26,21
34	15,57	79	23,73
35	25,52	80	78,35
36	44,56	81	21,88
37	33,35	82	13,62
38	35,72	83	51,85
39	8,65	84	19,40
40	17,82	85	14,05
41	67,98	86	55,16
42	24,91	87	21,68
43	14,89	88	38,11
44	55,65	89	79,87
45	23,16	90	17,20
Média: 51,00		DP: 62,61	
Min: 6,78		Máx: 504,87	

Com o propósito de determinar a distância entre cada forma e a desembocadura da respectiva bacia medida ao longo da rede de drenagem, interpolou-se um MNE das duas bacias com base nas curvas de nível e vértices geodésicos extraídos da cartografia topográfica 1:10000. Foi utilizada a adaptação do algoritmo ANUDEM (Hutchinson, 1988, 1989) implementada na ferramenta *Topo to Raster* do ArcGIS 9.1. Este é um método de interpolação determinístico, na medida em que associa valores a cada célula com base no ajustamento de uma função a

valores conhecidos, aqui definidos pelas curvas de nível e pontos cotados utilizados como *input*. Do ponto de vista matemático, é uma forma de interpolação *spline*, em que uma função polinomial é ajustada aos valores conhecidos de forma a definir uma superfície que passa exactamente por todos eles, e cuja curvatura (i.e. a segunda derivada da altitude em cada célula) é minimizada. Ao contrário de outros tipos de *spline*, porém, o algoritmo ANUDEM tem a vantagem de condicionar a interpolação de modo a produzir superfícies hidrologicamente correctas (i.e. com uma rede de drenagem conectada), e a representar adequadamente mudanças abruptas na superfície (Hengl e Evans, 2009). Estas vantagens fazem com que seja considerado particularmente adequado para análise morfométrica (op.cit.; Reuter e Nelson, 2009), tal como é ilustrado pelas suas anteriores utilizações na literatura (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2003; Carvalho Júnior *et al.*, 2010: 613; Gutiérrez *et al.*, 2010: 538)²².

Dado o carácter aplanado dos fundos de vale das duas ribeiras em estudo, sem canais com expressão nas curvas de nível utilizadas, foi necessário associar ao MNE a configuração das linhas de drenagem de forma a garantir uma rede perfeitamente conectada desde as cabeceiras da bacia até à desembocadura. Para isso, a rede hidrográfica (numa estrutura vectorial) foi extraída da cartografia 1:10000 e convertida para estrutura matricial, com um valor constante associado a cada célula. Foi depois usada uma função condicional para reduzir em 2 m a altitude das células do MNE original aos quais a rede se sobrepõe. Ao atribuir às células correspondentes às linhas de drenagem altitudes inferiores às células associadas à topografia envolvente, garantiu-se que os resultados de quaisquer análises hidrológicas realizadas com base no MNE partiram de uma configuração da rede de drenagem correcta²³. Por fim, foram eliminadas as depressões geradoras de acumulação do escoamento usando a ferramenta *Fill*²⁴, e foi determinada a direcção do escoamento a partir de cada célula (ferramenta *Flow Direction*).

²² Ao contrário da triangulação de Delaunay usada na construção de TINs, o ANUDEM não assenta em equações lineares para determinar as altitudes entre conjuntos de pontos de altitude conhecida, o que se por um lado tem a vantagem de não assumir superfícies planas no interior das curvas de nível que marcam os altos das vertentes, gerando superfícies mais aproximadas da realidade, por outro implica a geração de valores cuja amplitude pode extravasar a do conjunto de dados original (Hengl e Evans, 2009: 52).

²³ Foi utilizada a função *Con* no ArcGIS 9.1. Construiu-se um tema matricial (*Hid*) com um valor de 1 para todas as células indefinidas no tema da rede hidrográfica e 0 para as células integradas na rede usando a ferramenta *IsNull*. Depois, e sendo *Mod* o MNE original, utilizou-se a expressão condicional: *Con ("Hid" == 0, " Mod - 2", " Mod")*, assim subtraindo 2 m à altitude de cada célula do MNE quando esta integra da rede hidrográfica (=0) ou mantendo o seu valor original quando tal condição não se verifica (=1).

²⁴ Embora seja possível que estas depressões ocorram naturalmente, pretendeu-se apenas neste ponto produzir uma rede hidrográfica conectada, pelo que todas foram assumidas como artificiais.

Para determinar a distância à desembocadura de cada uma das 90 formas foto-interpretadas, recorreu-se à ferramenta *Flow Length*. O algoritmo associado determina, para cada célula de uma matriz e usando como *input* um tema de direcção do escoamento, a distância percorrida pelo fluxo até ao limite do tema. Dado que as formas foram representadas digitalmente por polígonos, determinou-se o valor mais baixo no interior de cada um usando a ferramenta *Zonal Statistics* (correspondendo à célula mais a jusante na desembocadura do complexo de ravinas representado). Por fim, e de maneira a associar a cada forma apenas a distância à desembocadura da respectiva bacia, subtraiu-se a todos os valores a distância entre a desembocadura da bacia e o limite do tema cartográfico (3496,01 m para a rib^a de Ulme, e 2490,46 m para a rib^a do Vale do Casal Velho)²⁵. Os valores resultantes são apresentados na Tabela 48.

2.5 Controlos topográficos: declive e curvatura

As propriedades da superfície do relevo exercem controlo sobre os processos erosivos de diferentes maneiras. O declive (i.e. primeira derivada da altitude) num dado ponto determina em grande parte a velocidade do escoamento, e portanto a sua capacidade de exercer tensão sobre a superfície onde tem lugar. A relação entre declive, velocidade e erosividade está representada de forma explícita nas fórmulas de Manning e da tensão tangencial, ambas já apresentadas no Capítulo I²⁶.

A segunda derivada da altitude, ou curvatura, descreve o grau de convexidade ou concavidade da superfície topográfica. Apesar de poder ser descrita com recurso a numerosos indicadores (Olaya, 2009: 152), dois destes são de maior relevância face aos processos erosivos em estudo. A curvatura de perfil (ou vertical) é medida na direcção de máximo declive, adquirindo valores positivos para superfícies côncavas e negativos para superfícies convexas. Em termos hidrológicos, um perfil convexo estará associado à aceleração do escoamento superficial (i.e. maior erosividade), o oposto ocorrendo com um perfil côncavo (op.cit.: 150).

A curvatura tangencial ou planar é medida horizontalmente, na direcção normal à de maior declive, e está associada à dispersão do escoamento em superfícies convexas (valores positivos), e à sua concentração em concavidades (valores negativos) (Summerfield, 1991;

²⁵ Por definição, a ferramenta calcula a distância ao longo da rede de drenagem entre cada célula e a célula mais a jusante presente no tema cartográfico. É também de referir que a drenagem na rib^a de Ulme inclui por vezes canais destinados a irrigar as culturas no fundo relativamente plano, complicando a configuração da rede, e aumentando potencialmente a distância estimada entre as formas e a desembocadura. Dado que o já referido carácter plano do fundo impossibilita a determinação de uma rede hidrográfica conectada exclusivamente em função da topografia, considerou-se este efeito sem relevância nas análises posteriormente realizadas.

²⁶ Vd. respectivamente I.4.1.1.3 e I.4.1.1.1.

Olaya, 2009: 152). As várias combinações de formas (côncavas, rectas, convexas) em perfil e em plano dão origem aos nove tipos fundamentais de formas de vertentes²⁷ (Figura 66).

Tabela 48 - Distância (*Ddesemb*) entre cada uma das 90 formas foto-interpretadas e a desembocadura da respectiva bacia.

Código	Ddesemb (m)	Código	Ddesemb (m)	Código	Ddesemb (m)
1	4709,2	31	5181,5	61	6577,7
2	4839,4	32	2843,8	62	10622,9
3	5382,3	33	5266,9	63	7682,2
4	5370,2	34	5382,3	64	6399,7
5	6221,6	35	5168,9	65	6325,6
6	3942,8	36	5748,6	66	6688,3
7	6616,0	37	5515,8	67	7913,6
8	4794,0	38	3941,1	68	8662,8
9	3786,6	39	6124,2	69	8782,5
10	3796,6	40	5262,4	70	12393,4
11	5923,7	41	5883,9	71	12052,6
12	4466,3	42	5449,2	72	6910,5
13	3745,9	43	5216,8	73	1551,6
14	2008,3	44	8371,9	74	1647,8
15	1614,5	45	7668,8	75	1395,5
16	5449,2	46	8668,9	76	1085,8
17	1614,5	47	9207,4	77	1543,6
18	6258,8	48	9285,6	78	3855,4
19	5167,2	49	6174,9	79	4017,4
20	5540,6	50	13907,3	80	3936,3
21	5254,5	51	5927,7	81	5294,0
22	5330,6	52	5384,2	82	5207,1
23	9186,2	53	5799,7	83	8955,7
24	9126,6	54	7903,8	84	8432,7
25	8860,9	55	8080,6	85	9930,7
26	6343,0	56	9270,8	86	13922,8
27	6114,5	57	13907,3	87	6018,5
28	5963,3	58	14937,6	88	2491,4
29	3550,7	59	5517,4	89	3787,5
30	11750,9	60	3957,9	90	4921,6
Média (m): 6252,1		Min (m): 1085,8			
DP (m): 2960,2		Máx (m): 14937,6			

Os efeitos destas propriedades geomorfométricas exercem-se igualmente sobre o movimento da água sub-superficial, promovendo maior concentração nas concavidades planares e dispersão nas convexidades (Dunne *et al.*, 1975; Anderson e Burt, 1978; Slattery, 2004). O rególito nas concavidades topográficas tenderá assim a apresentar um teor em humidade relativamente elevado, mantendo-se saturado durante mais tempo, e produzindo relativamente mais escoamento, seja qual for o mecanismo de produção considerado (i.e. Hortoniano ou de

²⁷ Estes tipos fundamentais implicam a assunção de que a forma planar e de perfil se mantém ao longo de toda a vertente, sendo portanto os casos mais simples possíveis. Naturalmente, se se considerarem mudanças de forma ao longo da mesma vertente, os tipos de formas serão muitos mais.

excesso de saturação). Em resultado, serão estas áreas a registar fluxos mais profundos (ou de maior raio hidráulico, caso o escoamento seja canalizado), e portanto com maior velocidade e erosividade²⁸, exercendo estes fluxos acção tanto no local como a jusante. Adicionalmente, a concentração do escoamento sub-superficial reflectir-se-á numa diminuição da resistência tangencial do rególito ao escoamento superficial, conforme já foi anteriormente considerado²⁹. Por último, é importante considerar o papel da forma topográfica na ocorrência de movimentos de massa, já identificados no Capítulo I como um importante factor de surgimento e evolução de ravinas. O declive é directamente proporcional à tensão tangencial exercida sobre a massa de rególito e inversamente proporcional à resistência tangencial deste³⁰. Ao mesmo tempo, a já referida perda de resistência tangencial associada à concentração da água sub-superficial determinará uma menor resistência por parte do rególito às forças que promovem o colapso.

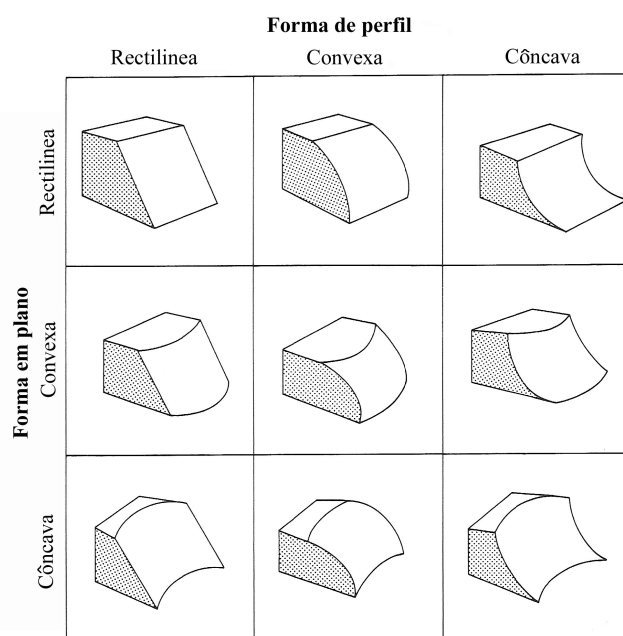


Figura 66 - As nove formas básicas de vertente resultantes das várias combinações entre curvaturas planares e de perfil positivas, negativas, ou nulas. Extraído de Summerfield (1991: 182).

Apesar de a rugosidade da topografia também ter um efeito relevante sobre a velocidade do escoamento³¹, a escala da informação topográfica utilizada nesta parte do trabalho (1:10000) não permite a sua inclusão. Assumiu-se assim que a rugosidade é constante na área analisada

²⁸ A partir de um determinado limiar de erosividade, o escoamento passará de laminar a concentrado com o entalhe de um canal, pelo que a canalização também ocorrerá preferencialmente nas concavidades.

²⁹ Vd. I. 4.1.2.2.

³⁰ Quanto mais elevado o declive da superfície, menor será a tensão normal ao plano de ruptura tangencial, um dos factores de resistência incluídos na equação de Coulomb (vd. I.4.1.2.2).

³¹ A rugosidade hidráulica foi já alvo de consideração em I.4.1.1.3.

ou, em alternativa, que as suas variações não condicionam de forma alguma os resultados obtidos para esta escala de análise.

Pretendeu-se investigar até que ponto existem relações entre as características das 90 formas foto-interpretadas, a sua posição nas respectivas bacias e a morfologia das vertentes onde se desenvolvem, expressa através do declive e das duas curvaturas descritas. Destas variáveis, o declive tem sido muitas vezes adoptado na literatura para procurar explicar padrões espaciais de ravinamento, frequentemente combinado com a área de drenagem em limiares topográficos³² ou indicadores compostos (e.g. Índice de Potência de Escoamento, Índice Topográfico de Encharcamento³³). A curvatura (de perfil) foi integrada por Martínez-Casasnovas *et al.* (2009) num modelo baseado em regressão logística para explicar a expansão lateral em grandes ravinas no NE de Espanha, e ambas as curvaturas foram adoptadas (juntamente com um conjunto de nove outras variáveis) para explicar a localização e a dimensão das ravinas numa área de estudo no Líbano por Bou Kheir *et al.* (2010).

Apesar de, tal como para o declive, existirem numerosos algoritmos disponíveis para o cálculo das curvaturas topográficas em ambiente SIG, as dimensões das formas em análise levantam um problema metodológico ao terem frequentemente expressão em maior ou menor grau na topografia 1:10000 utilizada, tal como é exemplificado na Figura 67. Como consequência, utilizar esta informação no seu estado original significaria estar a quantificar (igualmente em maior ou menor grau) a curvatura no interior (côncavo) das formas e não as características originais das vertentes onde se desenvolveram. Torna-se assim claro que só é possível investigar relações entre a morfologia das vertentes e as características de formas erosivas com expressão na topografia de base utilizada reconstruindo primeiramente a superfície topográfica pré-entalhe.

³² Vd. I.4.1.3.

³³ Vd. II. 2.1.

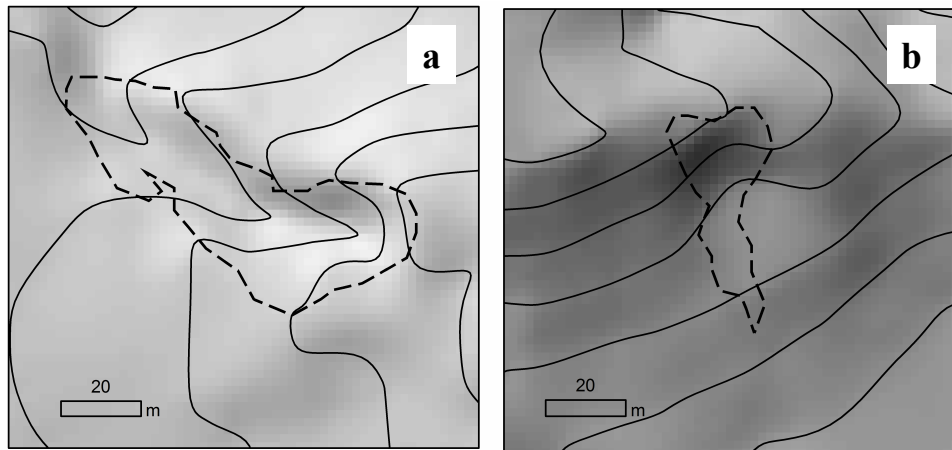


Figura 67 - Dois exemplos da expressão das formas em estudo nas curvas de nível 1:10000: (a) código F68; (b) código F44.

Uma análise da literatura mostrou que, embora não tenha sido possível encontrar qualquer trabalho centrado nas relações de controlo entre topografia antecedente e formas erosivas de grandes dimensões, vários autores procuraram já definir superfícies pré-erosão a fim de estimar volumes removidos por formas erosivas em estudo (e.g. Daba *et al.*, 2003; Perroy *et al.*, 2010; Buccolini *et al.* 2012). Wells e Gutiérrez (1982) e Alexander *et al.* (2008) estimaram superfícies associadas a níveis erosivos em *badlands*, a fim de quantificar volumes erodidos entre diferentes fases de evolução da paisagem.

A maioria das metodologias adoptadas baseou-se na interpolação linear das superfícies em falta com base na informação altimétrica disponível para as áreas envolventes³⁴, e assenta implicitamente na premissa fundamental de que a superfície modelada é representativa da original. Esta premissa é, porém, difícil de sustentar, já que a interpolação linear (bem como a triangulação de TIN usada por Alexander *et al.* (2008), em que as faces dos triângulos interpolados variam linearmente entre trios de pontos conhecidos) não permite obter valores fora do domínio dos valores conhecidos. Em consequência, se as formas erosivas em estudo se tiverem originado em concavidades ou convexidades no relevo, os resultados serão respectivamente uma sobre-estimação ou uma sub-estimação do volume total erodido. Embora esta assunção de topografia plana seja pouco relevante na estimação dos volumes de canais relativamente incipientes (poucos metros de largura), adquire necessariamente mais relevância em aplicações a formas erosivas de grandes dimensões como as que aqui se consideram.

³⁴ Wells e Gutiérrez (1982) e Daba *et al.*, (2005) não identificam a metodologia utilizada para a reconstrução da topografia pré-erosão.

Outro problema associado às reconstruções de superfícies topográficas pré-erosão publicadas é a falta de um processo de validação que permita quantificar o erro associado.

Em ordem a modelar a superfície topográfica antecedente das formas em estudo e a lidar ao mesmo tempo com a necessidade de validação, desenvolveu-se a metodologia que a seguir se descreve.

2.5.1 Estimação da topografia pré-entalhe

A metodologia adoptada estruturou-se em três etapas:

(1) selecção de um conjunto de áreas de topografia conhecida e não degradada por processos erosivos. Estas áreas foram delimitadas sobre as curvas de nível 1:10000 de forma semi-aleatória, usando repetidamente polígonos correspondentes a duas das formas foto-interpretadas. Criação de um tema com a informação altimétrica para toda a área de estudo excepto estas áreas.

(2) interpolação de superfícies para as áreas sem informação com base nos valores conhecidos envolventes, recorrendo a diferentes métodos;

(3) validação dos MNE resultantes através de comparação com a topografia removida em (1).

Ao contrário dos métodos habituais na literatura, esta metodologia tem a vantagem de incluir uma forma de validação das superfícies geradas, assentando para isso na premissa teórica de que não há diferenças significativas entre os contextos topográficos das formas erosivas em estudo e a topografia no restante das vertentes da área de estudo ou, por outras palavras, de que a capacidade de um dado método de interpolação para reproduzir as superfícies para as quais existe informação é igual à sua capacidade para o fazer com áreas sem informação.

Em primeiro lugar, foram gerados aleatoriamente 50 pontos usando a ferramenta *Generate random Points* do ArcGIS 9.1. Alguns dos pontos foram depois movidos de forma a: (1) não se situarem em fundos de vale aplanados; (2) não se situarem em áreas de planalto; (3) não se situarem nos sectores de cabeceira das bacias. Apesar de condicionarem o carácter aleatório da localização do conjunto, estes constrangimentos destinaram-se a eliminar do processo de modelação áreas onde não ocorrem quaisquer formas erosivas, centrando a atenção nos contextos topográficos onde estas se localizam.

De seguida, foram definidos os polígonos foto-interpretados possuidores dos valores de área (real) acima de 33% e 66% da distribuição, respectivamente 854,7 e 1873,5 m². Cópias destes polígonos foram depois alternadamente sobrepostas a cada um dos 50 pontos, sendo rodadas de forma a se situarem ao longo da vertente, orientação característica dos complexos de

ravinas em estudo³⁵. Uma vez todos os 50 polígonos sobrepostos a vertentes não degradadas, o tema com as curvas de nível foi convertido em pontos³⁶, dos quais o conjunto de 2344 integrado nas áreas intersectadas pelos polígonos foi extraído para um novo tema, mais tarde utilizado para validar os métodos de interpolação testados. A remoção dos pontos resultou num tema de altimetria sem informação no interior das áreas correspondentes aos 50 polígonos.

Interpolação de áreas em falta

Existem numerosos métodos para gerar superfícies tendo como *input* um conjunto de elementos (pontos, curvas de nível) de atributo conhecido, habitualmente a altitude.

Para além das suas características mais gerais, os vários algoritmos disponíveis em *softwares* comerciais permitem modificar parâmetros em cada um dos métodos, diversificando as suas vantagens e desvantagens, e a sua aplicabilidade. No presente trabalho, será apenas feita uma diferenciação geral dos vários métodos, e apenas aquele seleccionado para utilização será alvo de mais atenção. É importante levar em conta que não existe um método de interpolação melhor do que todos os outros e adaptado a todas as aplicações (Weibel e Heller, 1991), apresentando cada um vantagens e desvantagens consoante o fim em vista.

Face ao conjunto de todos os métodos de interpolação, podem ser desde logo diferenciados os que produzem superfícies matriciais (a grande maioria) e os que produzem superfícies vectoriais. No que diz respeito a estes últimos, o mais amplamente utilizado é claramente o método baseado na triangulação de Delaunay, resultante na representação do relevo como uma rede irregular de triângulos. Este método foi já utilizado no Capítulo II para modelar a topografia da totalidade da área de estudo (vd. II.2.1) e dele foi já apresentada uma caracterização sumária.

Os muitos métodos de interpolação centrados na geração de estruturas matriciais podem ser diferenciados em função de pelo menos quatro parâmetros (Eastman, 2006: 266; Heywood *et al.*, 2006: 196; Hengl e Evans, 2009: 52): (a) a exactidão/inexactidão; (b) o efeito de suavização (*smoothing effect*), (c) o efeito de proximidade; e (d) a existência de assunções

³⁵ Pretendeu-se, por um lado, usar polígonos com uma configuração plausível para o tipo de formas estudadas em vez de uma forma artificial (e.g. círculos), e por outro usar polígonos com áreas representativas das dimensões da maior parte da distribuição. Não se utilizaram valores médios, dado que estes iriam ser influenciados pelos valores das formas de maiores dimensões, que a análise de um gráfico de frequências acumuladas cruzando percentagem de formas e área por forma mostrou serem muito elevados face a todo o resto do conjunto.

³⁶ Ferramenta *Feature Vertices to Points* do ArcGIS 9.1.

geoestatísticas. Na Tabela 49 é apresentada uma classificação dos métodos mais habituais face a cada um deles.

O critério de exactidão/inexactidão diferencia os métodos em que a superfície criada mantém os valores de todos os pontos conhecidos (*inputs*) daqueles em que isso não acontece. Exemplos opostos são, respectivamente, a interpolação linear e a interpolação polinomial³⁷ (em que uma superfície é gerada pelo ajustamento de um polinómio aos pontos conhecidos, não passando forçosamente por todos eles).

O efeito de suavização (*smoothing*) refere-se ao grau de ajustamento dos valores resultantes aos dados originais, e tem expressão em dois aspectos. Por um lado, no afastamento entre os valores dos pontos originais e os dos pontos estimados que se lhes sobrepõem. Neste sentido, a noção de suavização não designa mais do que uma variação contínua entre um extremo exacto (em que os valores dos pontos originais são rigorosamente mantidos, i.e. não há suavização) e outro muito inexacto (em que os pontos resultantes se afastam bastante dos valores originais, i.e. há elevada suavização) (Neterer e Mitasova, 2008: 239). Por outro lado, a noção de suavização refere-se também às diferenças entre as amplitudes de variação dos valores originais e interpolados. Num método sem suavização, as amplitudes serão as mesmas, já que os valores estimados entre cada conjunto de pontos conhecidos variam sempre entre os valores destes últimos. Por oposição, as superfícies resultantes de métodos com suavização podem atingir valores acima ou abaixo dos valores extremos dos pontos que as delimitam. É de notar que, neste sentido, o método pode ser exacto e possuir ao mesmo tempo elevada suavização, desde que os valores originais sejam mantidos. A título de exemplo, os métodos baseados em *splines* (um tipo de polinómio) resultam frequentemente em valores que excedem a amplitude de variação dos dados originais, produzindo convexidades e concavidades em áreas sem informação. Embora esta seja frequentemente uma característica positiva na modelação do relevo, representando realisticamente topos e fundos de vale onde métodos de interpolação linear apenas produziriam extensões planas, o processo de interpolação pode produzir resultados absurdos se a suavização for exagerada, conforme mostra a Figura 68.

³⁷ A interpolação polinomial usando todos os pontos conhecidos (global) é também chamada de superfície de tendência (*trend surface*), devido ao facto de definir uma tendência geral nos dados, sem se ajustar necessariamente a pontos específicos (e.g. Eastman, 2006: 267).

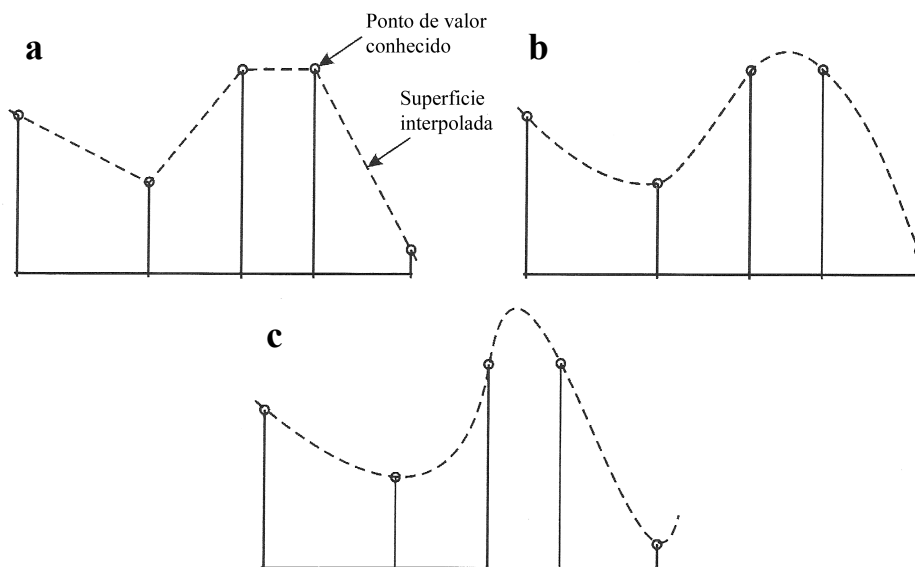


Figura 68 - O efeito da suavização associado a diferentes métodos de interpolação. (a) interpolação linear, sem qualquer suavização. Depressões têm uma configuração pouco natural e topos são frequentemente aplanados. (b) interpolação com *splines*. Topos e depressões têm uma configuração natural. Notar que a suavização resultou em valores cuja amplitude é ligeiramente superior à dos dados originais. Se os parâmetros de suavização forem exagerados, as superfícies resultantes podem afastar-se muito da topografia que se pretende reproduzir (c). Adaptado de Hengl e Evans (2009: 53).

O efeito de proximidade refere-se à área em torno de cada ponto a estimar, na qual todos os pontos de valor conhecido influenciam o processo de interpolação. Varia entre um extremo global (todos os valores conhecidos são utilizados), e um extremo local (apenas os valores imediatamente adjacentes são considerados). Cada algoritmo permite normalmente ao utilizador definir o número de valores adjacentes a influenciar a estimativa.

Por último, o critério da assunção de relações geostatísticas diferencia dois conjuntos de métodos: (1) em que uma análise preliminar da auto-correlação espacial entre os valores conhecidos determina a importância de cada um no processo de estimativa; (2) em que uma formulação matemática pré-existente é utilizada indiscriminadamente para toda a superfície a gerar. No primeiro caso, é assumido que existem relações estatísticas na distribuição espacial dos valores da variável em estudo, sendo a Krigagem o método deste tipo (i.e. método geostatístico) mais frequentemente utilizado. No segundo caso, não há qualquer assunção, pelo que os valores resultantes são apenas uma função da formulação utilizada e dos valores conhecidos. Estes métodos são designados de determinísticos.

Tabela 49 - Características gerais de alguns métodos de interpolação utilizados para produzir estruturas matriciais.

Método	Comentários	Exactidão	Suavização	Proximidade	Determinístico/ Geoestatístico
Interpolação linear	Pode assentar numa triangulação de Delaunay prévia, com o valor para cada célula definido pela superfície linear do triângulo a que se sobrepõe (e.g. Surfer 10; ArcGIS 9.1). Noutros casos, valores são calculados com base na distância aos valores conhecidos envolventes, sem triangulação (e.g. curvas de nível; Eastman (2006: 269)	Exacto	Nenhuma	Local	Determinístico
Distância Inversa Ponderada¹	Valor estimado é função dos valores dos pontos mais próximos (em número definido pelo utilizador), sendo o peso de cada valor no resultado determinado pela distância.	Exacto	Nenhuma	Local a Global	Determinístico
Interpolação Polinomial	Superfície estimada resulta do ajustamento de um polinómio a uma quantidade de pontos definida pelo utilizador; pode não ser fiel aos valores de <i>input</i> .	Inexacto	Elevada	Local a Global	Determinístico
Splines	Superfície estimada resulta do ajustamento de um tipo de polinómio a uma quantidade de pontos definida pelo utilizador, sujeito a dois constrangimentos: (1) superfície passa por todos os pontos de <i>input</i> ; (2) curvatura resultante é minimizada.	Exacto	Variável	Local a Global	Determinístico
ANUDEM	Semelhante ao <i>Spline</i> , mas modificado de forma a forçar uma rede hidrográfica conectada e a poder incorporar quebras no declive. Foi concebido para usar pontos e linhas como <i>input</i> .	Exacto	Variável	Local a Global ²	Determinístico
Krigagem ordinária	Assenta na análise e modelação estatística prévia da variação das diferenças entre todos os valores conhecidos com a distância espacial e/ou a direcção. As funções definidas são utilizadas para estimar valores com base nos pontos conhecidos circundantes.	Exacto	Média	Local a Global	Geoestatístico
Vizinhança natural³	Assenta na construção prévia de uma rede de polígonos de Voronoy abrangendo todos os pontos conhecidos. Cada ponto a estimar é inserido na rede, sendo esta modificada de forma a integrá-lo. O valor estimado para o ponto é a média dos valores conhecidos dos pontos adjacentes, ponderada pelas percentagens do novo polígono que se sobrepõem a cada um dos polígonos da rede original.	Exacto	Nenhuma	Local	Determinístico
Média móvel	Assenta num filtro de janela móvel corrido sobre as áreas em estudo. Para cada passo, o valor no centro é a média dos valores conhecidos abrangidos pelo filtro. Pode ou não ser ponderada face à distância ao centro.	Inexacto	Elevada	Local	Determinístico

¹ No original, *Inverse Distance Weighted*, ou IDW

² Na sua implementação específica do ArcGIS (ferramenta *Topo to Grid*), o algoritmo utiliza um máximo de quatro pontos de *input*, sendo portanto local.

³ *Natural Neighbor* no original.

A comparação dos vários métodos determinou a escolha da interpolação por *splines* para o presente caso, por duas razões: (1) é um método exacto (i.e. os valores de *input* mantêm-se na superfície gerada); (2) permite um grau de suavização variável, podendo representar

concauidades e convexidades no terreno e representar realisticamente a superfície topográfica (Hengl e Evans, 2009: 53). Estas mesmas razões levaram à eliminação dos métodos da Distância Inversa Ponderada, Vizinhança Natural e da Média Móvel por não permitirem estimar superfícies curvas entre pontos conhecidos, da interpolação polinomial por não ser exacta, e da Krigagem por frequentemente exagerar a suavização do terreno e ser sensível a valores estatisticamente diferentes do resto da população conhecida (*hot-spots*), o que a torna um método reconhecidamente pouco apropriado para a modelação da altitude (op.cit.: 51).

Em função da análise da literatura levada a cabo com respeito à estimação da topografia antecedente no estudo de formas erosivas, optou-se por aplicar a metodologia referida usando adicionalmente a interpolação linear (através da construção prévia de um TIN) e a adaptação do método ANUDEM de Hutchinson (1988, 1989) implementada no ArcGIS 9.1 na forma da ferramenta *Topo to Raster* e já utilizada na determinação da distância das formas à desembocadura das respectivas bacias (II.2.4). Embora este último método inclua constrangimentos ao processo de interpolação destinados a forçar uma topografia hidrologicamente correcta e a permitir incluir quebras na topografia e redes hidrográficas vectoriais, é em essência uma forma de *spline*, sendo, como já foi referido, considerado por vários autores particularmente adequado à modelação do terreno com fins morfométricos (Hengl e Evans, 2009: 55; Reuter e Nelson, 2009:273).

A interpolação por *splines* usando o ArcGIS 9.1 possui duas variantes, com formulações matemáticas diferentes³⁸. Embora ambas cumpram as mesmas condições fundamentais (a superfície resultante passa pelos pontos de *input* e a sua curvatura é minimizada), o método *regularizado* (*Regularized*) produz superfícies relativamente suavizadas que variam de forma mais gradual, não só para os valores estimados para a variável em estudo (altitude) como para a primeira derivada destes valores. Assim, este método é particularmente adequado ao cálculo da segunda derivada da altitude (curvatura) a partir do MNE resultante (ESRI, 2012³⁹). Na sua implementação no ArcGIS 9.1, o processo de minimização da curvatura é modificado de forma a minimizar os valores da terceira derivada da superfície. O peso destes valores no processo é determinado pelo parâmetro *weight* (definido pelo utilizador), com valores mais elevados a produzirem uma superfície mais suavizada, e portanto menos próxima da amplitude de variação dos valores de *input*.

³⁸ A descrição do método é baseada na sua implementação no ArcGIS 9.1. Outras aplicações apresentarão variações em termos de parâmetros e algoritmos (i.e. Surfer 10, GRASS GIS).

³⁹ Texto consultado em <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/009z/009z00000078000000.htm> a 16/07/2012

Por oposição, o método dito *de tensão* (*Tension*) produz superfícies que variam menos gradualmente, mas cuja amplitude de variação é mais semelhante à dos pontos conhecidos. Neste caso, o algoritmo de minimização da curvatura corre sobre a primeira derivada da superfície, e o parâmetro *weight* descreve o peso que lhe está associado, com um valor mais elevado a produzir uma superfície mais irregular (i.e. menos suavizada), mas mais ajustada aos valores de entrada (ESRI, 2012).

É importante levar em conta que a natureza polinomial da interpolação por *splines* dificulta a modelação adequada de quebras no declive. Tomando como exemplo a transição entre uma vertente e um fundo de vale aplanado, a tendência será para a superfície modelada continuar a configuração da vertente, originando uma depressão e só depois estabilizando nos valores do fundo⁴⁰. Um problema análogo ocorre nas transições entre vertentes e áreas de planalto. Este é o chamado *overshooting* (Hengl e Evans, 2009), um problema com que o algoritmo *Topo to Raster* lida permitindo a incorporação de linhas de quebra na interpolação.

O processo de interpolação das áreas em falta foi levado a cabo usando no total 13 métodos. Para além da interpolação linear com um TIN e do *Topo to Raster*, foram testados cinco métodos de *spline* regularizado e cinco de *spline* de tensão, fazendo variar o parâmetro *weight* (*w*) entre os valores de referência referidos na documentação do ArcGIS 9.1. Assim, usaram-se valores de 0; 0,001; 0,01; 0,1 e 0,5 para o *spline* regularizado, e 0; 1; 4; 7 e 10 para o método de tensão. No caso específico do método *Topo to Raster* foram utilizados separadamente como *input* pontos e curvas de nível, não só de forma a averiguar a diferença nos valores resultantes, mas ao mesmo tempo para explorar a capacidade do algoritmo de correr sobre curvas de nível, característica que o distingue face aos restantes métodos de interpolação⁴¹.

Este algoritmo foi corrido usando o valor estabelecido por defeito para o parâmetro denominado "penalização de rugosidade" (*roughness penalty*), e que consiste no quadrado da segunda derivada da altitude, utilizado como uma medida de irregularidade da superfície e minimizado pelo algoritmo durante a interpolação (ESRI, 2012). O valor utilizado foi 0.

Dada a enorme quantidade de pontos resultante da conversão das curvas de níveis originais (num total de 3084979 no interior das duas bacias), originando redundância e aumentando a capacidade de computação exigida, optou-se por simplificar a informação. Para isso, as curvas

⁴⁰ Este problema por ser inferido através da análise da Figura 68.

⁴¹ De forma a eliminar do tema de curvas de nível as áreas abrangidas pelas 50 áreas de teste, utilizou-se a ferramenta *Clip* para criar um novo tema contendo apenas as porções das curvas abrangidas, e a ferramenta *Symmetrical difference* para gerar um novo tema em que essa informação foi eliminada.

de nível foram ligeiramente simplificadas⁴², sendo o processo realizado de forma a não haver um afastamento maior do que 25 cm entre o resultado e o original. Esta variação é insignificante em comparação com a resolução de 2 m adoptada para os temas a interpolar.

Com o objectivo de reduzir a capacidade de computação necessária para os processos de interpolação sem prejudicar os resultados, foi definido um zonamento sobre a área de estudo, sendo os processos de interpolação corridos para cada zona em separado. Após a análise da distribuição das 50 áreas de teste, estruturaram-se sete polígonos contíguos de forma a todas serem abrangidas. Os limites foram definidos de forma a não se situarem junto a nenhuma das áreas, assegurando assim um número de pontos mais do que suficiente para os algoritmos de interpolação (foi adoptado um total de 12 pontos para cada célula interpolada). É importante referir que, não havendo sobreposição nos limites de zonas contíguas, os resultados obtidos para estes sectores da área de estudo são prejudicados pela falta de pontos conhecidos. Porém, sendo o objectivo desta metodologia obter valores apenas para o interior das 50 áreas de teste, considerou-se este facto sem qualquer importância. A configuração das zonas é apresentada na Figura 69.

O subconjunto dos pontos sobreposto a cada zona foi extraído para um novo tema, sendo estes temas os *inputs* para os vários métodos de interpolação espacial adoptados, já referidos acima. Para cada método, os sete temas parciais foram sucessivamente interpolados e depois integrados num tema final⁴³. Por último, o conjunto de 2344 pontos anteriormente extraídos para validação foi sobreposto aos dez temas finais resultantes, sendo os valores correspondentes em cada um deles extraídos para uma tabela. A análise desta permitiu calcular as características das distribuições dos erros absolutos associados cada um dos métodos testados (Tabela 50).

⁴² Ferramenta *Simplify Line* (ArcGIS 9.1)

⁴³ Foi utilizada a ferramenta *Mosaic to New Raster* do ArcGIS 9.1.

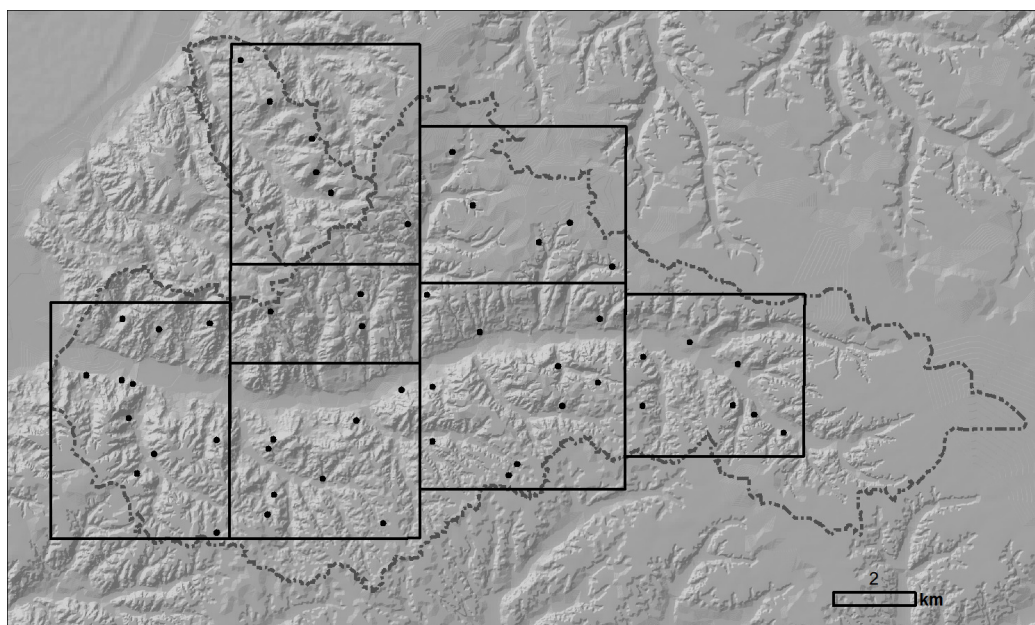


Figura 69 - O zonamento definido sobre as 50 áreas de teste (pontos a negro). A linha a tracejado define os limites das duas bacias em estudo.

Tabela 50 - Características das distribuições de erro absoluto (raiz quadrada do quadrado da diferença entre valor real e interpolado) associadas a cada um dos métodos de interpolação testados. *Spline Ten* e *Spline Reg* identificam os métodos de Tensão e Regularizado, sendo *w* o parâmetro *weight* adoptado. P50, P80 – percentis 50 e 80 da série; DP – desvio-padrão. Os resultados estão organizados por ordem crescente do valor da média de forma a facilitar a análise, com os resultados do método com menor erro médio a negrito.

Método de interpolação	Parâmetros estatísticos (valores em m)					
	Média	Min	Max	P50	P80	DP
Topo to Raster (linhas)	0,752	0,000	5,399	0,440	1,203	0,872
Spline Reg w=0,01	0,767	0,000	5,001	0,463	1,176	0,889
Spline Reg w=0,1	0,771	0,000	5,395	0,470	1,218	0,913
Spline Reg w=0,001	0,810	0,000	5,338	0,493	1,239	0,904
Spline Reg w=0,5	0,813	0,000	5,827	0,473	1,242	1,000
Spline Reg w=0	0,834	0,000	5,456	0,526	1,288	0,912
Spline Ten w=1	0,887	0,000	5,375	0,540	1,496	0,939
Spline Ten w=4	0,954	0,000	5,354	0,587	1,654	0,976
Spline Ten w=7	0,998	0,000	5,349	0,619	1,758	1,004
Spline Ten w=10	1,034	0,000	5,350	0,639	1,828	1,028
TIN	1,214	0,000	6,908	0,815	1,962	1,239
Topo to Raster (pontos)	1,589	0,000	12,773	1,094	2,383	1,795
Spline Ten w=0	3,463	0,001	72,642	1,084	3,494	7,500

A análise da tabela permite verificar que o erro absoluto médio mais reduzido (75,2 cm) foi obtido com o método *Topo to Raster* usando como *input* curvas de nível. Por oposição, o mesmo algoritmo corrido sobre o mesmo conjunto de pontos que serviu de *input* a todos os restantes métodos produziu os segundos piores resultados.

Considerando os resultados dos *splines*, o método regularizado produziu consistentemente resultados superiores ao método de tensão, sendo o valor mínimo de erro absoluto médio obtido (76,7 cm) superior ao do *Topo to Raster* por apenas 1,5 cm. Por oposição, os piores resultados de todos foram obtidos com o *spline* com Tensão e $w=0$.

A interpolação de TIN resultou no terceiro erro médio mais elevado, mostrando um ajustamento à realidade inferior à grande maioria dos métodos *spline* testados para a área em estudo, sem dúvida um resultado da já referida capacidade destes métodos para interpolar valores para lá da amplitude de variação dos valores conhecidos e assim representar curvaturas topográficas onde não se possui informação inicial.

Com base nos valores obtidos, procurou-se otimizar os parâmetros de entrada dos dois algoritmos com melhores resultados em ordem a averiguar até que ponto seria possível minimizar o erro. No caso do *Topo to Raster*, a penalização de rugosidade (*roughness penalty*) foi definida usando os valores 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5. No caso do *spline* regularizado, testaram-se diferentes valores de w (o parâmetro *weight*, correspondente ao peso da terceira derivada da superfície resultante no processo de interpolação). Tendo como referência o valor de 0,01 já testado, definiram-se três valores equidistantes entre este e 0,001, e outros três entre 0,01 e 0,1. Os valores utilizados e os resultados são sintetizados na Tabela 51, e mostram que não foi possível obter erros inferiores aos do *Topo to Raster* com curvas de nível como *input*, definindo claramente este método como o mais adequado à estimação de superfícies topográficas na área de estudo, em acordo com a sua amplamente aceite adequação à análise morfométrica (e.g. Hengl e Evans, 2009; Reuter e Nelson, 2009).

É importante neste ponto acentuar que o que na realidade se quantificou foi a capacidade de diferentes algoritmos de interpolação para reproduzir os valores e a configuração das curvas de nível à escala 1:10000, aqui assumidas como representando a superfície real. Qualquer futura aplicação dos resultados obtidos usando informação a outras escalas (e.g. coberturas LiDAR, curvas de nível 1:25000) implica necessariamente a assunção de que estes resultados não variam significativamente com a escala.

Finalmente, foi interpolada a topografia antecedente das 90 formas em estudo. Após a remoção dos segmentos das curvas de nível (simplificadas) correspondentes aos polígonos foto-interpretados, o mapa resultante foi usado como *input* para o método considerado óptimo. De forma a melhor ilustrar o resultado final (de resolução 2 m), foram geradas automaticamente curvas de nível com uma equidistância de 5 m (a mesma das curvas 1:10000 originais), sendo as superfícies original e reconstruída contrastadas na Figura 70. Os três exemplos apresentados ilustram bem a semelhança, em termos de curvatura e configuração,

entre as curvas de nível reconstruídas e as inicialmente presentes na topografia não entalhada envolvente às formas em estudo.

Tabela 51 - Resultados da otimização dos parâmetros de entrada dos dois métodos com menor erro. w = parâmetro *weight* no *spline* regularizado; R = *roughness penalty* no algoritmo *Topo to Raster* (utilizando com *input* curvas de nível). P50, P80 - percentis 50 e 80 da série; DP - desvio-padrão. Os resultados estão organizados por ordem crescente do valor da média, com os valores do método com erro mais reduzido a negrito.

Método de interpolação	Parâmetros estatísticos (valores em m)					
	Média	Min	Max	P50	P80	DP
Spline Reg w=0,033	0,758	0,001	5,206	0,458	1,160	0,890
Spline Reg w=0,055	0,762	0,001	5,291	0,468	1,191	0,896
Spline Reg w=0,078	0,766	0,000	5,349	0,466	1,190	0,905
Spline Reg w=0,008	0,771	0,000	5,042	0,463	1,171	0,890
Spline Reg w=0,006	0,776	0,000	5,095	0,466	1,175	0,892
Spline Reg w=0,003	0,791	0,000	5,210	0,480	1,191	0,897
Topo to Raster R=0,4	0,825	0,000	5,499	0,496	1,318	0,922
Topo to Raster R=0,3	0,871	0,000	4,920	0,547	1,442	0,923
Topo to Raster R=0,2	0,938	0,000	5,585	0,618	1,519	0,980
Topo to Raster R=0,1	0,987	0,000	5,634	0,664	1,599	1,007
Topo to Raster R=0,5	1,020	0,000	5,716	0,701	1,635	1,029

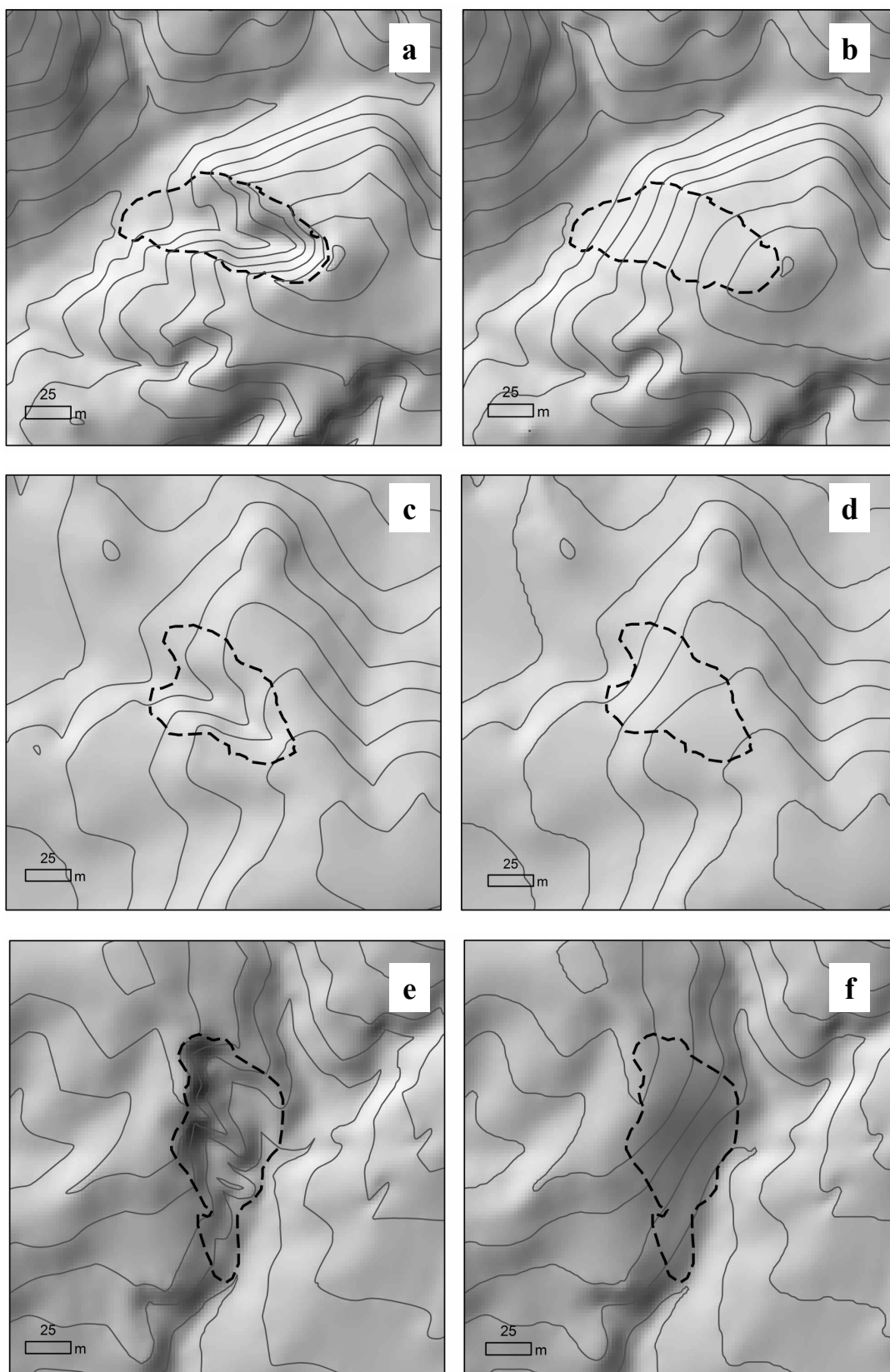


Figura 70 - Três exemplos de reconstrução da topografia usando o método e a parametrização ótimos (*Topo to Raster* com *Roughness penalty* 0 e curvas de nível como *input*). (a), (c), (e) - topografia original; (b), (d), (f) - superfícies reconstruídas.

2.5.2. Cálculo dos declives e curvaturas

O MNE da topografia pré-erosão foi utilizado para construir temas de declive e curvatura, planar e de perfil⁴⁴, para as bacias em estudo. Por fim, foram calculados os valores médios, mínimos e máximos das duas curvaturas e os valores médios e máximos de declive associados à superfície antecedente de cada forma com base nos conjuntos de células abrangidos por cada um dos 90 polígonos (usando a ferramenta *Zonal Statistics*). O resultado é apresentado na Tabela 52.

2.6. Área de drenagem na desembocadura e razão área real - área de drenagem na desembocadura

A área de drenagem é um indicador amplamente reconhecido da quantidade potencial de escoamento que atinge um determinado local, e portanto da capacidade deste para exercer ação erosiva. Para além da componente superficial, o fluxo sub-superficial influencia a coesão e consequentemente a resistência tangencial do rególito, com efeitos não apenas na sua erodibilidade face ao escoamento, mas também (caso exista um canal) sobre a resistência da cabeceira e das paredes às tensões promotoras de movimentos de massa. Na presença das condições adequadas, o escoamento sub-superficial pode adicionalmente promover a ocorrência de tubulação, processo cujas associações ao ravinamento já foram alvo de atenção⁴⁵.

⁴⁴ Foi usada a ferramenta *Curvature* (ArcGIS 9.1).

⁴⁵ Com respeito à resistência tangencial, vd. I.4.1.2.2. Esta informação é complementada pela consideração dos movimentos de massa e da tubulação em I.4.2.

Tabela 52 - Curvaturas de perfil e planar mínimas, médias e máximas, e declives médios e máximos associados a cada forma. DP: desvio-padrão.

Código	Curvatura de Perfil			Curvatura Planar			Declive (°)	
	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Máx	Méd
1	-1,61	5,86	1,20	-4,46	3,20	-1,07	38,22	28,35
2	-4,91	1,00	-0,76	-2,22	5,40	0,09	27,76	20,94
3	-4,59	1,94	-0,34	-2,62	4,46	0,53	23,54	15,14
4	-3,33	9,71	1,31	-4,04	4,01	-0,84	40,13	35,83
5	-6,12	3,40	-0,13	-2,15	7,76	0,40	28,50	19,90
6	-1,52	2,87	-0,13	-1,72	1,44	0,69	22,17	16,22
7	-6,71	9,10	-0,41	-7,10	3,75	0,02	29,08	18,94
8	-4,88	4,35	-0,29	-3,70	6,35	0,28	32,32	14,70
9	-4,91	6,62	-0,71	-10,40	2,66	-0,91	27,50	15,98
10	-14,27	8,27	-0,52	-11,20	16,24	0,23	42,64	18,03
11	-3,25	5,05	-0,12	-5,09	2,51	-0,67	27,66	23,60
12	-6,79	6,36	-0,05	-17,05	5,22	-0,08	38,16	11,36
13	-0,89	3,24	0,28	-2,62	1,63	-0,13	22,07	14,73
14	-10,06	4,01	-0,34	-4,61	9,42	-0,19	25,83	19,66
15	-5,49	7,65	-0,34	-6,67	6,40	0,25	36,37	18,71
16	-4,65	4,47	-1,22	-7,15	3,93	-0,55	34,55	22,79
17	-4,42	8,00	-0,49	-3,72	2,03	-1,49	32,97	23,64
18	-1,79	7,09	0,33	-6,59	2,35	-0,74	28,64	18,13
19	-7,82	3,83	-0,03	-8,80	8,37	-0,31	32,07	23,40
20	-5,55	4,61	-0,41	-6,60	2,22	-1,13	34,74	19,13
21	-1,85	0,85	-0,33	-0,77	2,72	0,26	22,12	16,76
22	-3,13	10,92	0,09	-10,76	0,93	-0,65	37,56	25,64
23	-11,12	7,44	0,58	-6,60	5,35	-0,68	37,30	25,37
24	-6,76	5,60	0,26	-5,53	4,98	-0,06	40,90	27,37
25	-3,82	5,06	-0,09	-4,09	2,05	-0,43	27,31	20,50
26	-3,36	4,11	0,30	-5,29	4,58	-0,26	30,57	12,52
27	-4,68	8,63	0,07	-11,83	3,00	-0,51	32,80	12,27
28	-4,59	3,03	-1,04	-5,62	1,41	-1,64	29,53	21,65
29	-0,64	4,27	0,87	-3,76	2,36	-0,41	25,33	13,92
30	-2,55	5,32	-0,15	-6,09	3,34	-0,05	27,49	9,63
31	-2,12	2,53	-0,51	-4,48	0,94	-1,38	28,18	20,27
32	-3,12	2,24	-0,05	-2,42	0,64	-0,90	29,20	18,26
33	-2,04	3,13	-0,27	-4,50	1,30	-1,17	29,95	18,81
34	-2,48	6,87	0,62	-3,42	2,77	-0,83	40,14	31,02
35	-4,07	7,29	-0,04	-11,04	3,99	-0,98	30,74	21,61
36	-1,39	6,02	0,27	-4,40	1,51	-0,02	23,35	12,40
37	-8,00	4,99	-1,69	-6,47	4,24	-0,74	34,15	22,18
38	-3,07	5,18	-0,51	-5,77	5,34	-0,84	22,85	15,09
39	-4,24	4,07	0,58	-4,60	1,39	-1,81	29,09	25,33
40	-3,83	4,03	-0,11	-5,45	2,96	-0,19	29,54	21,78
41	-4,89	6,40	-0,81	-8,00	4,17	-0,63	35,48	25,34
42	-6,15	4,93	0,17	-2,62	2,94	0,22	38,23	23,90
43	-6,17	5,93	0,79	-0,51	3,34	0,98	37,01	33,12
44	-5,34	7,73	-0,50	-6,31	6,50	-0,16	31,12	20,78
45	-7,87	8,07	-0,31	-9,76	6,42	-0,67	33,08	26,34

Tabela 52 (continuação).

Código	Curvatura de Perfil			Curvatura Planar			Declive (°)	
	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Máx	Méd
46	-6,12	4,82	0,46	-4,86	6,12	-0,10	34,22	23,64
47	-2,77	5,55	0,61	-1,96	2,87	-0,11	34,61	27,82
48	-1,08	5,58	1,48	-1,81	1,69	-0,01	34,05	25,99
49	-2,53	2,61	-0,28	-4,31	2,16	0,06	23,50	12,79
50	-9,27	2,09	-1,46	-6,64	7,26	-0,84	33,44	24,49
51	-5,55	3,41	0,41	-3,44	1,45	-0,52	33,31	22,31
52	-11,61	10,30	-0,26	-15,65	4,53	-0,95	40,82	29,13
53	-5,32	5,51	-0,10	-2,86	4,49	0,23	23,72	17,70
54	-4,59	2,68	0,15	-0,92	3,65	0,67	24,58	18,10
55	-6,40	7,05	-1,52	-10,00	3,99	-2,23	36,11	22,53
56	-7,26	6,85	-0,71	-8,08	4,82	-0,72	30,23	20,28
57	-3,54	2,48	-0,11	-2,62	2,73	0,09	21,81	14,53
58	-7,80	4,16	-1,23	-15,22	11,28	-0,34	37,70	26,81
59	-3,35	4,21	-0,22	-8,51	3,04	-0,73	29,92	21,72
60	-2,30	2,86	0,01	-2,45	2,78	0,15	21,76	10,99
61	-5,72	7,35	0,20	-9,51	9,69	0,54	36,92	22,27
62	-5,64	6,45	0,35	-6,04	5,80	0,41	31,34	19,62
63	-6,28	8,93	-1,10	-15,95	4,80	-3,16	41,05	25,86
64	-6,13	9,06	0,21	-5,68	1,84	-0,88	28,99	13,88
65	-3,39	7,18	-0,45	-9,12	3,57	-0,67	29,62	19,72
66	-3,12	8,13	0,12	-8,54	1,39	-0,27	31,30	16,36
67	-6,88	9,30	-0,52	-8,08	5,02	0,08	32,29	23,45
68	-3,36	4,81	-0,19	-4,57	4,74	0,15	23,23	12,58
69	-3,80	5,06	-0,66	-5,73	6,24	-0,72	30,58	21,28
70	-7,56	4,12	-0,35	-4,45	3,85	-0,55	36,69	31,22
71	-4,52	6,09	0,08	-2,82	5,40	0,37	34,13	19,75
72	-2,94	2,92	-0,79	-2,71	0,98	-0,76	30,20	20,37
73	-3,55	5,24	-0,67	-4,55	1,58	-0,62	32,52	19,58
74	-4,73	8,64	-0,04	-7,05	1,19	-1,30	29,74	26,19
75	-4,15	5,46	0,04	-5,71	3,90	0,27	42,59	23,27
76	-4,47	5,87	0,08	-5,88	5,21	-0,02	33,30	25,54
77	-4,84	3,90	-0,53	-6,76	5,09	0,20	32,06	18,49
78	-8,02	6,19	-1,44	-4,90	1,16	-0,98	39,49	16,25
79	-3,18	4,11	0,21	-3,19	2,39	-0,16	36,57	25,66
80	-3,48	5,33	-0,08	-6,37	4,74	0,03	27,61	16,59
81	-1,81	4,00	-0,08	-3,84	1,59	-0,64	25,24	16,67
82	-3,31	6,17	-0,08	-2,79	5,42	-0,26	29,26	21,16
83	-2,40	5,20	0,15	-4,55	4,02	-0,04	32,72	14,43
84	-4,34	7,98	-0,06	-8,34	2,14	0,19	26,82	14,58
85	-1,49	1,56	-0,20	-1,83	1,00	-0,41	23,43	21,72
86	-5,24	5,29	-0,29	-6,18	3,50	-0,63	27,50	17,59
87	-4,17	7,17	-0,64	-5,79	3,11	-0,17	31,88	20,59
88	-5,87	3,21	0,03	-4,64	4,44	-0,52	25,29	17,52
89	-3,51	7,95	0,08	-7,80	1,75	-0,69	23,42	14,80
90	-3,55	4,15	-1,00	-4,69	3,49	-0,35	27,44	18,61
Mín	-14,27	0,85	-1,69	-17,05	0,64	-3,16	21,76	9,63
Máx	-0,64	10,92	1,48	-0,51	16,24	0,98	42,64	35,83
Méd	-4,69	5,43	-0,17	-5,84	3,89	-0,40	31,12	20,39
DP	2,42	2,19	0,58	3,34	2,47	0,65	5,39	5,20

Foi já feita referência no Capítulo I aos numerosos trabalhos em que se procurou determinar a localização de ravinas efêmeras utilizando limiões de área de drenagem e declive. Com respeito a formas mais desenvolvidas (e portanto a escalas temporais mais alargadas) Burkard e Kostaschuk (1997) estudaram através de foto-interpretação o desenvolvimento de um conjunto de 44 ravinas ao longo de 62 anos no Canadá, determinando que a área de drenagem total das formas (medida na desembocadura) explicou 77% da variância do crescimento em termos de área. No SE de Espanha, Vandekerckhove *et al.* (2000b) quantificaram o desenvolvimento de 55 ravinas ao longo de dois anos, utilizando regressão múltipla para determinar que a área de drenagem medida na desembocadura (que denominaram *área de drenagem original*) explicou 68% da variância em termos de evolução volumétrica. A mesma variável foi relacionada com o volume total de um conjunto de 46 ravinas na mesma área por Vandekerckhove *et al.* (2001), tendo explicado 65% da variância⁴⁶.

Em paralelo com estes resultados, é importante levar em conta que a assunção de um controlo determinante sobre o desenvolvimento de ravinas por parte da área de drenagem pressupõe igualdade das restantes condições. Foram já apresentados exemplos de situações em que variações no coberto vegetal e possivelmente a intensidade dos episódios de precipitação vieram influenciar significativamente a evolução observada⁴⁷. Ao mesmo tempo, a existência de condições diferenciadas em termos de rególito e topografia, com todas as suas implicações sobre a erosividade e a erodibilidade, poderá exercer controlo sobre a correspondência desenvolvimento-área de drenagem entre as formas numa mesma área de estudo, sendo um exemplo adicional desta situação a já referida expansão de formas para além dos limites da sua área de drenagem original.

Tendo estas condicionantes sempre presentes, assumiu-se como hipótese de trabalho que, nas bacias em estudo, a área de drenagem medida na desembocadura de uma dada forma é um indicador significativo do seu potencial total para se expandir. De acordo com este pressuposto, o referido potencial reduzir-se-á à medida que as formas se desenvolvem. Esta abordagem foi já adoptada por Vandekerckhove *et al.* (2000b), que caracterizaram o grau de desenvolvimento da sua amostra de 55 formas em termos da razão entre a área de drenagem medida na cabeceira e a área de drenagem total medida na desembocadura (respectivamente assumidas como área de drenagem presente e original). Embora tal não tenha sido referido, o uso destas variáveis implicou alguns pressupostos discutíveis: em primeiro lugar, a adopção

⁴⁶ Todos estes trabalhos incidiram sobre ravinas de desnível, sendo as quebras no declive proporcionadas respectivamente pela antiga margem de um lago e pelas margens de cursos de água temporários.

⁴⁷ Vd. I.5.1.

da área de drenagem a montante de uma forma para representar o seu estado de desenvolvimento num dado momento implicou a assunção de que este desenvolvimento é independente da inclinação topográfica (já que a área de drenagem é por definição planimétrica). Neste contexto (e de acordo com as relações geométricas já consideradas em III.2.2), uma forma num declive acentuado pode ser mais extensa do que outra num declive suave, possuindo ambas a mesma área de drenagem a montante e na desembocadura, e portanto aparentando ambas o mesmo grau de desenvolvimento.

Em segundo lugar, a adopção da cabeceira como local de medição da área de drenagem implica duas assunções: (a) que a forma se expande através de uma única cabeceira (i.e. é uma forma simples); (b) que o escoamento que atinge a forma lateralmente não é significativo para o seu desenvolvimento (tal como anteriormente salientado por Burkard e Kostaschuk, 1997: 903). Em contraste, as formas que constituem objecto do presente trabalho não satisfazem nenhum destes pressupostos, tratando-se na maioria dos casos de complexos de ravinhas com múltiplas cabeceiras, cuja configuração areal (por oposição a linear) revela claramente um papel importante por parte dos processos laterais.

Em terceiro lugar, o rácio utilizado por Vandekerckhove *et al.* (2000b) implica o pressuposto de que o desenvolvimento máximo possível para uma forma é definido pelo limite da área de drenagem medida na desembocadura, sendo atingido quando a área a montante da forma é nula, e portanto não abarcando situações em que a forma se expande para além da sua área de drenagem original.

Levando em conta estes pressupostos teóricos, optou-se no presente trabalho por adoptar como indicador de desenvolvimento a razão entre a área real das formas (já calculada em III.2.2 e apresentada na Tabela 41) e a sua área de drenagem medida na desembocadura. Este rácio permite estabelecer uma comparação entre as dimensões reais atingidas até ao momento (e não a sua projecção num plano) e o potencial total possuído pelo escoamento para promover o desenvolvimento da forma ao longo do seu desenvolvimento, sem pressupor controlo absoluto por parte do escoamento proveniente de uma única cabeceira (como aconteceria se fossem comparadas duas áreas de drenagem). Quanto maior o valor do índice, maior o grau relativo de desenvolvimento da forma⁴⁸.

⁴⁸ É de notar que, no contexto deste rácio de áreas, o valor 1 não tem qualquer significado, dado que a comparação é entre uma área medida levando em conta a altimetria, e uma área planimétrica.

2.6.1. Cálculo das áreas de drenagem

Começou-se por adoptar o tema de escoamento acumulado já anteriormente utilizado para calcular as distâncias das formas às desembocaduras das respectivas bacias, e cujo processo de construção já foi descrito em III.2.4. A análise do tema, porém, tornou claro que, como consequência da suavização da topografia associada aos métodos *spline* (de que o *Topo to Raster* não é excepção), a interpolação gerou depressões irrealistas adjacentes aos limites de algumas das formas. Assim, optou-se por modelar a drenagem a montante de cada forma construindo um modelo TIN com base nas curvas de nível 1:10000. Este modelo foi depois convertido para *raster* através de interpolação linear com uma resolução de 2 m. O tema matricial resultante, depois de corrigido de forma a eliminar depressões artificiais, foi sucessivamente utilizado no cálculo da direcção e da acumulação do escoamento⁴⁹.

Dado que todas as formas em estudo se localizam nas vertentes e possuem áreas de drenagem relativamente reduzidas, considerou-se que não houve qualquer desvantagem na perda das qualidades de modelação hidrológica do *Topo to Raster*. Em contraste, estas foram devidamente aproveitadas no anterior cálculo da distância das formas à desembocadura das respectivas bacias, que implicou a geração de uma rede hidrográfica muito mais complexa através de fundos de vale relativamente aplanados. Uma comparação entre a topografia e a rede de drenagem modeladas para a mesma forma com base no *Topo to Raster* e num TIN é apresentada na Figura 71.

A análise conjunta dos 90 polígonos foto-interpretados, do MNE TIN gerado (na forma de um relevo de sombras) e da rede de drenagem modelada permitiu definir linhas transversais à desembocadura de cada uma das formas. As 90 linhas foram depois sobrepostas ao tema de acumulação de escoamento, e a ferramenta *Zonal Statistics* utilizada para associar a cada uma (e portanto a cada forma) o somatório dos valores das células subjacentes, i.e. o número total de células drenando para cada desembocadura. Finalmente, as 90 áreas de drenagem foram obtidas multiplicado estes valores por 4 (área em m² representada por cada célula de 2 m de lado), e articuladas com a área real das formas no indicador de desenvolvimento já descrito. Todos os valores são apresentados na Tabela 53.

⁴⁹ Ferramentas *Flow Direction* e *Flow Accumulation*.

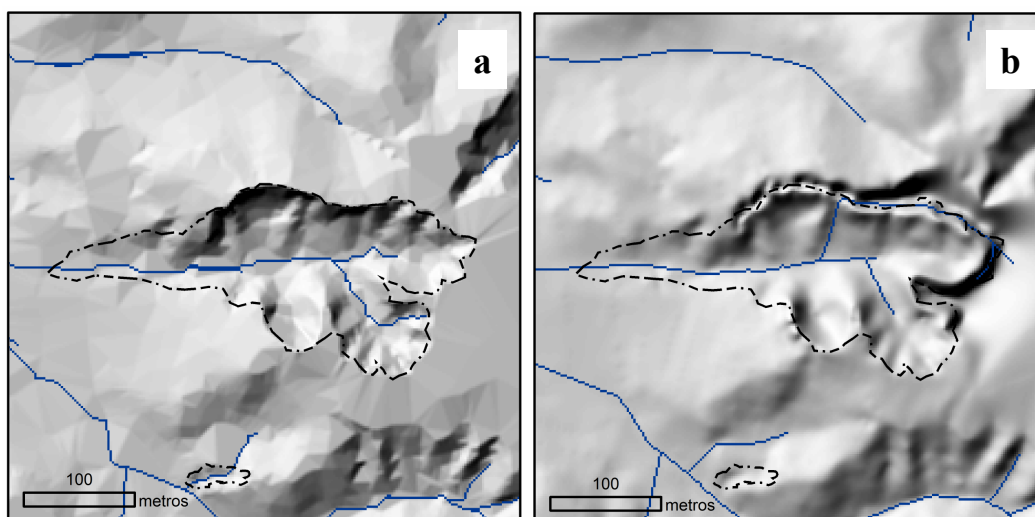


Figura 71 - Topografia e rede de drenagem modeladas triangulando um TIN (a) e usando o algoritmo *Topo to Raster* (b). Notar a depressão artificial produzida pelo *Topo to Raster* imediatamente a norte da forma em (b), e o efeito sobre a drenagem. As linhas de água foram definidas em ambos os casos usando um limiar mínimo de área de drenagem de 1000 células (4000 m²).

2.7. Orientação das vertentes

A orientação (ou exposição) de uma vertente exerce um importante controlo sobre a quantidade de radiação solar recebida ao longo do tempo, com os maiores contrastes verificando-se entre as vertentes expostas a norte (valores mínimos) e a sul (valores máximos), com as vertentes orientadas a este e oeste apresentando valores intermédios.

A radiação solar influencia os processos erosivos através da vegetação, da hidrologia das vertentes e das propriedades mecânicas do próprio rególito. As taxas de evapotranspiração superiores associadas às áreas expostas a sul fazem com que, verificando-se temperaturas elevadas e precipitação relativamente pouco abundante, a vegetação seja afectada por *stress* hídrico mais rapidamente após episódios chuvosos, promovendo um coberto vegetal menos denso e adaptado à secura. Por sua vez, a exposição do solo ao impacto da precipitação promove o encrostamento⁵⁰ e conseqüente redução da permeabilidade, promovendo a produção de mais escoamento superficial potencialmente erosivo (Kirkby, 2004: 35). Na presença de argilas expansivas, será adicionalmente de esperar que a ocorrência mais frequente de ciclos de humedecimento-dessecação venha promover uma fracturação mais

⁵⁰ O processo de encrostamento/selagem do solo foi já considerado com relação ao seu efeito sobre a infiltração em em I.4.1.1.4. O seu efeito sobre a erodibilidade do solo foi considerado em I.4.1.2.2.

abundante, contribuindo para a ocorrência de tubulação e movimentos de massa, e aumentando a erodibilidade do rególito face ao escoamento superficial⁵¹.

Tabela 53 - Áreas de drenagem medidas na desembocadura de cada forma (*Adren*, m²), e razão entre a área real da forma (*Ar*) e *Adren*, utilizada como indicador do grau de desenvolvimento. DP - desvio-padrão.

Código	Adren (m ²)	Ar/Adren	Código	Adren (m ²)	Ar/Adren
1	1196	0,27	46	2564	0,59
2	2444	0,46	47	1472	0,60
3	2824	0,60	48	1340	0,38
4	472	0,42	49	6288	0,59
5	5340	0,83	50	3096	0,29
6	936	1,07	51	2316	0,24
7	3972	0,70	52	4696	0,47
8	11912	0,95	53	9608	0,53
9	3016	0,33	54	1604	0,66
10	4080	0,91	55	7688	0,10
11	2388	0,52	56	1628	0,60
12	2688	0,61	57	31412	0,99
13	964	0,88	58	3880	0,26
14	4048	0,15	59	5916	0,39
15	5896	0,87	60	12716	0,77
16	944	0,79	61	2612	0,71
17	3216	0,24	62	6232	0,66
18	7600	0,46	63	2676	0,32
19	1800	0,71	64	10756	0,31
20	12224	0,20	65	4644	0,44
21	872	0,42	66	7660	0,28
22	2080	0,37	67	3932	0,49
23	2320	0,42	68	4916	0,46
24	8868	0,14	69	2948	0,46
25	1232	0,42	70	1700	0,68
26	10088	0,57	71	10868	0,08
27	26712	0,49	72	3352	0,44
28	468	0,45	73	2784	0,72
29	2384	0,42	74	2224	0,19
30	49736	0,67	75	2192	0,91
31	3760	0,32	76	6444	0,40
32	3120	0,33	77	5316	0,84
33	6896	0,22	78	1016	0,79
34	420	0,88	79	320	2,97
35	1920	0,41	80	7652	0,67
36	1340	0,78	81	6316	0,41
37	1812	0,57	82	2160	0,45
38	1660	0,49	83	5644	0,58
39	1508	0,16	84	2408	0,45
40	444	1,25	85	408	0,51
41	11312	0,12	86	6088	0,41
42	6148	0,66	87	5412	0,37
43	112	3,69	88	8724	0,26
44	512	1,47	89	11184	0,33
45	4772	0,21	90	1204	0,50
		Média	Min	Max	DP
Adren		5160,8	112	49736	6827
Ar/Adren		0,58	0,08	3,69	0,49

⁵¹ Com respeito à tubulação e aos seus factores, vd. I.4.2.1. A fracturação por dessecação e os seus efeitos sobre a erosão e os movimentos de massa foram já considerados em 4.1.2.2. e 4.2.

Por oposição, as vertentes expostas a norte tenderão a manter o solo húmido durante períodos mais longos, promovendo um coberto vegetal mais denso e exigente em água, um solo relativamente mais protegido da precipitação, e taxas de infiltração mais elevadas. De forma geral, estas vertentes reúnem melhores condições para a pedogénese, promovendo solos mais profundos. Ao mesmo tempo, porém, maiores quantidades de água num solo mais profundo tendem a originar condições mais propícias à ocorrência de movimentos de massa (Kirkby, 2004: 35).

Embora a orientação das vertentes seja um reconhecido factor de controlo sobre os processos erosivos, é habitualmente preterida na literatura a favor de outros factores de influência mais directa (i.e. declive, área de drenagem). Flügel *et al.* (2003) utilizaram a exposição para definir unidades homogéneas em termos de processos e factores erosivos num levantamento regional na África do Sul (sem quantificar em que medida se relacionou com as formas encontradas) e Meyer e Martínez-Casasnovas (1999) procuraram utilizá-la para explicar a existência de ravinas em áreas de vinha no NE de Espanha, embora sem sucesso. Optou-se no presente trabalho por incluir a exposição como possível factor de ravinamento em função da elevada frequência, nas duas bacias em estudo, de vertentes orientadas a N e a S, as direcções associadas a maiores contrastes na radiação solar recebida.

2.7.1. Cálculo da orientação das vertentes

De forma a aferir a influência da orientação sobre a forma e as dimensões das 90 formas em estudo, foi utilizado como tema de base o MNE com a topografia pré-erosão reconstituída (vd. 2.5.1). De outra forma, os resultados seriam condicionados pelas próprias formas erosivas que, como já foi dito, têm frequentemente expressão na topografia 1:10000 utilizada.

Foi primeiramente criado um tema de orientações usando a ferramenta *Aspect* do ArcGIS 9.1. Dado que o *output* da ferramenta é um tema matricial com valores reais entre -1 e 360 (sendo -1 associado por defeito a áreas planas), os valores foram classificados em octantes, correspondendo às direcções cardeais e colaterais⁵². O cruzamento deste tema com os polígonos das 90 formas (previamente convertidos para *raster*) usando a ferramenta *Tabulate area* permitiu gerar uma tabela associando a cada forma o número de células pertencente a cada uma das classes de orientação. Definiu-se assim a orientação dominante na área delimitada por cada um dos 90 polígonos. Os resultados são apresentados na Tabela 54. A Figura 72 mostra a distribuição das percentagens de formas por orientação dominante.

⁵² Não foram necessárias nove classes, dado que não havia quaisquer áreas planas nas superfícies topográficas antecedentes às 90 formas erosivas.

Tabela 54 - Orientação dominante (*ODom*) por forma.

Cód	ODom	Cód	ODom	Cód	ODom
1	N	31	SE	61	W
2	SW	32	SE	62	S
3	SE	33	SE	63	SE
4	W	34	NW	64	SW
5	NW	35	W	65	NE
6	S	36	SE	66	SE
7	SE	37	E	67	SE
8	E	38	E	68	NW
9	E	39	SW	69	W
10	E	40	SE	70	W
11	SE	41	E	71	W
12	E	42	S	72	E
13	W	43	S	73	E
14	E	44	SE	74	E
15	NE	45	W	75	E
16	E	46	S	76	E
17	E	47	SW	77	NE
18	W	48	SE	78	SE
19	S	49	NW	79	W
20	S	50	SW	80	SE
21	S	51	SE	81	S
22	SE	52	SE	82	SE
23	SE	53	SE	83	W
24	E	54	SW	84	SW
25	S	55	SW	85	S
26	S	56	S	86	NW
27	S	57	W	87	NE
28	NW	58	W	88	E
29	E	59	SE	89	NE
30	W	60	SE	90	W

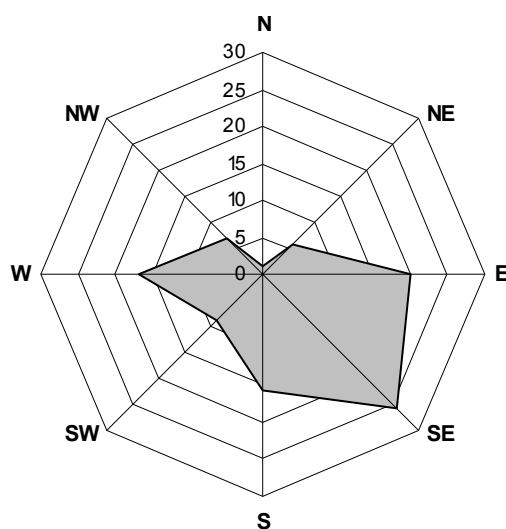


Figura 72 - Percentagem de formas por orientação dominante.

2.8. Índice de Potência do escoamento e Índice Topográfico de Encharcamento

A fundamentação para o uso destes dois índices topográficos no contexto do ravinamento foi já apresentada no Capítulo II.2.1, e a sua validade não se alterou com a transição entre a perspectiva regional baseada na escala 1:25000 que enquadrava aquela parte do trabalho e a análise detalhada de duas pequenas bacias à escala 1:10000 que aqui se leva a cabo. As formulações foram igualmente apresentadas, pelo que serão aqui apenas descritas as metodologias adoptadas para o cálculo dos valores.

A topografia pré-erosão reconstruída foi utilizada como *input* para a construção de um tema de direcção de escoamento e outro de acumulação do escoamento. Este último foi multiplicado pela área associada a cada célula (4m^2) de forma a produzir um tema de área de drenagem, e depois dividido por 2 (largura da célula), obtendo-se assim a área de drenagem específica.

A ferramenta *Raster Calculator* foi depois utilizada para operacionalizar as formulações dos dois índices, usando o tema de declives anteriormente produzido (vd. III.2.5.2).

Finalmente, e à imagem do procedimento adoptado anteriormente com relação ao declive e às curvaturas, a ferramenta *Zonal Statistics* foi utilizada para calcular os valores médios e máximos apresentados pelos dois índices nas áreas correspondentes a cada um dos 90 polígonos. Os resultados são apresentados na Tabela 55.

3. Análise

De acordo com os objectivos estabelecidos para esta parte do trabalho, designadamente a investigação dos factores que controlam as características gerais e a localização das formas em estudo, a análise levada a cabo desenvolveu-se em quatro etapas.

Foi primeiramente feita uma breve síntese dos valores apresentados pelas três propriedades utilizadas para caracterizar os complexos de ravinas: área, perímetro e sinuosidade.

Numa segunda fase, foi construída uma matriz de correlações com o objectivo de analisar as associações entre pares de variáveis. Aquelas consideradas mais promissoras foram analisadas com maior pormenor a fim de determinar o seu ajustamento a diferentes tipos de funções, e assim ultrapassar as condicionantes da correlação linear. Ao mesmo tempo, esta análise destinou-se a determinar até que ponto variáveis com eventuais relações não lineares deveriam ser sujeitas a alguma forma de transformação em ordem a melhor se ajustarem a modelos de natureza linear.

Esta segunda fase incluiu ainda uma análise gráfica da distribuição das três características já referidas face à exposição dominante, a fim de aferir a possível relevância desta variável nominal.

Tabela 55 - Valores máximos e médios de Índice de Potência do Escoamento (IPE) e Índice Topográfico de Encharcamento (ITE) no interior da topografia antecedente de cada uma das 90 formas.

Cód	IPE		ITE		Cód	IPE		ITE	
	Max	Méd	Max	Méd		Max	Méd	Max	Méd
1	92,04	22,61	6,02	3,94	46	104,72	10,63	6,95	3,71
2	137,90	14,27	7,97	4,02	47	59,29	11,88	5,49	3,57
3	48,77	4,80	6,21	3,85	48	73,99	14,26	6,16	3,73
4	43,70	15,54	4,41	3,08	49	141,81	7,54	7,34	4,56
5	372,83	10,75	7,32	3,81	50	391,02	30,15	6,88	3,95
6	48,58	14,48	6,33	4,84	51	74,16	11,82	7,12	3,94
7	267,60	11,30	7,85	3,87	52	1292,45	19,96	10,73	3,36
8	1047,17	13,22	8,42	4,39	53	49,44	7,61	6,61	4,04
9	146,69	16,35	7,00	4,62	54	39,93	9,58	5,94	4,27
10	377,81	9,54	8,07	3,93	55	354,81	33,43	7,23	4,45
11	165,64	17,73	7,14	3,96	56	135,18	11,39	7,41	3,75
12	35,19	4,19	7,30	4,31	57	71,44	27,12	8,35	5,56
13	14,73	8,53	5,97	4,70	58	250,39	14,74	6,19	3,23
14	105,39	9,44	7,43	3,75	59	823,59	40,09	8,40	4,36
15	310,36	14,68	8,44	4,22	60	140,20	11,40	10,36	5,18
16	99,21	11,76	5,90	3,75	61	125,51	11,03	6,77	3,76
17	453,80	59,35	7,38	4,97	62	5931,79	65,72	13,89	4,19
18	334,71	26,66	9,20	5,05	63	210,96	20,81	8,02	3,49
19	149,97	20,44	7,24	4,00	64	1406,62	39,85	10,32	5,36
20	1152,09	35,65	9,18	4,68	65	656,37	23,09	7,94	4,19
21	45,02	13,39	5,81	4,82	66	179,41	17,73	7,66	4,79
22	543,77	29,31	11,12	4,38	67	287,87	11,68	7,55	3,53
23	234,91	17,39	8,46	3,78	68	211,93	6,73	9,30	4,41
24	76,36	14,99	6,57	3,84	69	172,96	13,51	7,64	3,79
25	35,03	11,69	5,78	4,22	70	140,08	20,77	5,95	3,78
26	359,13	23,43	10,80	5,25	71	45,69	7,01	5,03	3,73
27	1991,93	33,32	11,18	5,52	72	280,58	19,63	7,76	4,60
28	138,36	20,97	6,34	3,92	73	189,10	16,06	6,81	4,27
29	76,01	12,40	8,60	5,05	74	81,48	31,46	7,00	4,72
30	1496,87	18,71	11,24	5,36	75	135,84	10,94	6,60	3,67
31	618,78	42,18	8,18	5,06	76	312,85	17,70	7,88	3,83
32	164,65	18,36	7,20	4,66	77	549,16	13,95	7,43	4,09
33	689,18	37,51	8,98	4,94	78	72,05	7,27	5,62	3,85
34	26,02	10,68	4,72	3,19	79	33,49	12,02	5,42	3,81
35	107,62	15,74	7,05	4,33	80	1199,59	17,00	10,09	4,35
36	13,28	5,50	5,75	4,65	81	379,71	23,66	8,37	5,17
37	62,89	11,72	5,12	3,61	82	144,41	13,71	7,16	3,99
38	74,16	10,15	7,72	4,37	83	152,26	9,79	8,41	4,52
39	285,91	48,71	7,54	4,59	84	80,22	4,87	7,18	3,68
40	83,80	10,72	5,71	3,71	85	29,38	16,56	5,21	4,61
41	336,96	35,11	8,11	4,31	86	309,17	20,50	7,74	4,42
42	24,48	14,07	5,78	4,14	87	334,41	13,80	7,16	3,79
43	15,52	8,36	3,79	2,89	88	693,71	51,76	9,12	5,15
44	85,26	8,70	7,05	3,77	89	1652,43	46,97	9,81	5,36
45	149,89	15,82	6,37	3,39	90	108,96	9,48	6,17	3,84

Numa terceira fase, os conhecimentos resultantes das fases anteriores foram utilizados na construção de um modelo de regressão linear múltipla, com vista a aferir a capacidade do conjunto das variáveis seleccionadas para explicar as propriedades das formas. Finalmente, recorreu-se numa quarta fase à técnica da regressão logística para investigar os controlos sobre a localização das formas, variável dependente a cuja natureza binomial (i.e. presença vs. ausência) esta técnica se ajusta particularmente.

3.1. Área, perímetro e sinuosidade: uma caracterização

Os valores individuais obtidos para as 90 formas com respeito às três variáveis foram representados nas Tabelas 41 e 47. Apenas os parâmetros descritivos gerais serão aqui repetidos (Tabela 56), complementados com representações gráficas das distribuições (Figura 73).

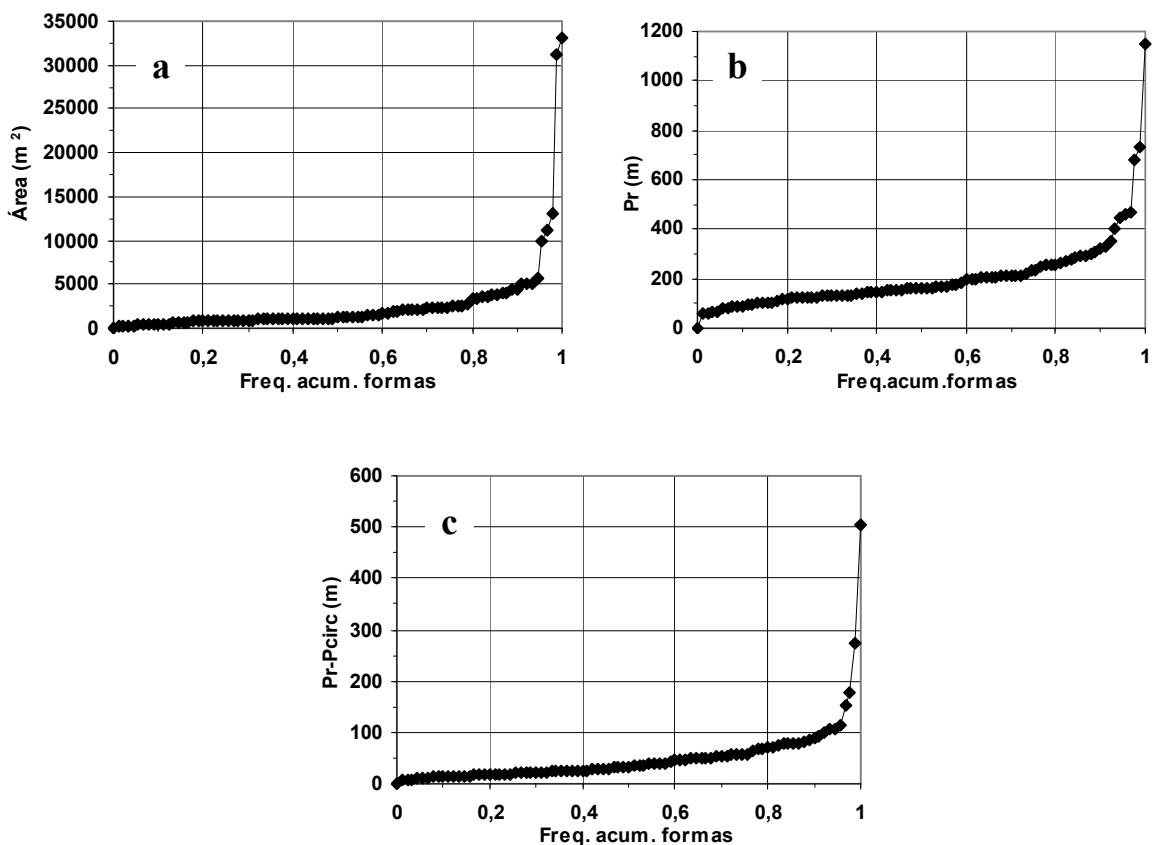


Figura 73 - Relação entre frequência acumulada de formas e (a) área; (b) perímetro; (c) sinuosidade (*Pr-Pcirc*), com valores organizados por ordem crescente.

Tabela 56 - Parâmetros descritivos das distribuições de Área (*Ar*), Perímetro (*Pr*) e Sinuosidade (*Pr-Pcirc*). DP é o desvio-padrão.

	Média	Min	Max	DP
Ar (m²)	2692,2	196,0	33151,5	4972,9
Pr (m)	206,0	56,4	1150,3	154,3
Pr-Pcirc (m)	51,00	6,78	504,87	62,96

No que diz respeito à área⁵³, as formas variam por duas ordens de magnitude, atingindo no máximo mais de 3 ha e possuindo um valor médio de 2692 m². Conforme a Figura 73 (a) mostra, porém, cerca de 94% das formas possuem valores abaixo dos 6000 m², e apenas quatro se estendem por mais do que um hectare. Distribuição semelhante ocorre com relação ao perímetro (Figura 73 (b)), cuja variação também atravessa duas ordens de magnitude entre algumas dezenas e mais de um milhar de metros. Das 90 formas, 92% estão abaixo dos 400 metros, e apenas uma excede o milhar. Finalmente, o indicador de sinuosidade adotado apresenta uma distribuição em tudo semelhante às anteriores, com 89% das formas abaixo dos 90 m, e apenas duas formas excedendo os 200m (Figura 73 (c)).

3.2. Correlação linear entre pares de variáveis

De forma a estabelecer uma primeira análise das relações entre as variáveis em estudo, todos os valores foram integrados numa só tabela, e foi utilizado o SPSS 15.0 para calcular os coeficientes de correlação linear bivariada (Tabela 57). As relações significativas são de seguida descritas.

Tabela 57 (Página seguinte) - Coeficientes de correlação linear entre pares de variáveis em estudo. O grau de significação (*p*) é apresentado abaixo de cada coeficiente, a itálico. Valores a negrito identificam coeficientes considerados significativos (*p*<0,05). *Ar* - área real (m²); *Pr* - perímetro real (m); *Pr_Pcirc* - Sinuosidade (diferença entre o perímetro real e o perímetro de um círculo com a mesma área) (m); *D_des* - distância à desembocadura (m); *Ad_des* - Área de drenagem na desembocadura (m²); *Ar/Ad_des* - razão área real/área de drenagem na desembocadura; *Cper_min* - curvatura de perfil mínima (adimensional); *Cper_max* - curvatura de perfil máxima; *Cper_med* - curvatura de perfil média; *Cpl_min* - curvatura planar mínima; *Cpl_max* - curvatura planar máxima; *Cpl_med* - curvatura planar média; *Dec_max* - declive máximo (°); *Dec_med* - declive médio; *IPE_max* - Índice de Potência do Escoamento máximo (adimensional); *IPE_med* - Índice de Potência do Escoamento médio; *ITE_max* - Índice Topográfico de Encharcamento máximo (adimensional); *ITE_med* - Índice Topográfico de Encharcamento médio.

⁵³ De acordo com as considerações tecidas em III.2.2.3, os valores aqui apresentados correspondem à área e ao perímetro calculados levando em conta a variação altimétrica, i.e. área e perímetro reais (*Ar*, *Pr*).

Ar	Pr	Pr-Paire	D_Des	Ad_des	Ar/Ad_des	Cper_min	Cper_max	Cper_med	Cpl_min	Cpl_max	Cpl_med	Dec_max	Dec_med	IPE_max	IPE_med	ITE_max	ITE_med	
Ar	1,000	0,930	0,785	0,246	0,916	0,085	0,086	-0,067	0,030	0,028	0,014	0,204	-0,200	-0,417	0,251	0,084	0,423	0,447
	p=...	p=0,000	p=0,000	p=0,019	p=0,000	p=0,428	p=0,420	p=0,531	p=0,793	p=0,796	p=0,895	p=0,054	p=0,059	p=0,000	p=0,017	p=0,433	p=0,000	p=0,000
	Pr	1,000	0,919	0,153	0,922	0,052	0,028	0,028	0,017	-0,068	0,087	0,254	-0,153	-0,507	0,360	0,096	0,577	0,474
		p=...	p=0,000	p=0,150	p=0,000	p=0,676	p=0,793	p=0,795	p=0,871	p=0,526	p=0,413	p=0,016	p=0,149	p=0,000	p=0,000	p=0,570	p=0,000	p=0,000
		Pr-Paire	1,000	0,119	0,852	0,022	0,012	0,109	0,022	-0,128	0,075	0,173	-0,067	-0,428	0,339	0,070	0,537	0,394
			p=...	p=0,264	p=0,000	p=0,856	p=0,908	p=0,304	p=0,835	p=0,229	p=0,480	p=0,103	p=0,530	p=0,000	p=0,001	p=0,511	p=0,000	p=0,000
		D_Des	1,000	0,254	0,254	-0,111	-0,124	-0,056	-0,062	-0,064	0,148	0,035	0,018	0,088	0,100	-0,020	0,001	-0,123
			p=...	p=0,016	p=0,016	p=0,298	p=0,245	p=0,603	p=0,564	p=0,546	p=0,163	p=0,741	p=0,869	p=0,410	p=0,548	p=0,853	p=0,995	p=0,249
				Ad_des	1,000	-0,095	0,065	0,023	0,007	-0,063	-0,017	0,094	-0,156	-0,423	0,338	0,228	0,517	0,517
					p=...	p=0,372	p=0,546	p=0,827	p=0,946	p=0,553	p=0,877	p=0,380	p=0,141	p=0,000	p=0,001	p=0,031	p=0,000	p=0,000
				Ar/Ad_des	1,000	0,008	0,008	-0,071	0,153	0,238	0,034	0,420	0,102	0,121	-0,077	-0,296	-0,268	-0,247
					p=...	p=0,938	p=0,506	p=0,150	p=0,024	p=0,753	p=0,000	p=0,338	p=0,338	p=0,255	p=0,474	p=0,005	p=0,011	p=0,019
				Cper_min	1,000	0,000	0,000	-0,296	0,344	0,465	-0,659	0,037	-0,489	-0,263	-0,077	0,033	-0,034	0,437
					p=...	p=0,938	p=0,506	p=0,150	p=0,001	p=0,000	p=0,000	p=0,727	p=0,000	p=0,012	p=0,471	p=0,756	p=0,753	p=0,000
				Cper_max	1,000	0,000	0,000	0,000	0,120	-0,574	0,112	-0,212	0,477	0,239	0,178	0,097	0,207	-0,213
					p=...	p=0,005	p=0,005	p=0,005	p=0,260	p=0,000	p=0,291	p=0,045	p=0,000	p=0,023	p=0,094	p=0,583	p=0,050	p=0,043
				Cper_med	1,000	0,000	0,000	0,000	0,120	-0,574	0,112	-0,212	0,477	0,239	0,178	0,097	0,207	-0,213
					p=...	p=0,002	p=0,002	p=0,002	p=0,001	p=0,000	p=0,081	p=0,005	p=0,921	p=0,169	p=0,614	p=0,960	p=0,858	p=0,593
				Cpl_min	1,000	0,000	0,000	0,000	0,321	-0,185	0,292	0,011	0,146	0,054	0,005	0,019	0,057	0,057
					p=...	p=0,002	p=0,002	p=0,002	p=0,001	p=0,081	p=0,005	p=0,921	p=0,169	p=0,614	p=0,960	p=0,858	p=0,593	0,057
				Cpl_max	1,000	0,000	0,000	0,000	0,321	-0,185	0,292	0,011	0,146	0,054	0,005	0,019	0,057	0,057
					p=...	p=0,001	p=0,001	p=0,001	p=0,001	p=0,081	p=0,005	p=0,921	p=0,169	p=0,614	p=0,960	p=0,858	p=0,593	0,057
				Cpl_med	1,000	0,000	0,000	0,000	0,321	-0,185	0,292	0,011	0,146	0,054	0,005	0,019	0,057	0,057
					p=...	p=0,009	p=0,009	p=0,009	p=0,009	p=0,009	p=0,003	p=0,201	p=0,526	p=0,675	p=0,645	p=0,748	p=0,000	p=0,000
				Dec_max	1,000	0,000	0,000	0,000	0,274	0,313	0,105	0,045	-0,249	0,022	-0,458	-0,079	-0,108	-0,108
					p=...	p=0,058	p=0,058	p=0,058	p=0,018	p=0,840	p=0,840	p=0,540	p=0,840	p=0,840	p=0,840	p=0,457	p=0,312	p=0,312
				Dec_med	1,000	0,000	0,000	0,000	0,274	0,313	0,105	0,045	-0,249	0,022	-0,458	-0,079	-0,108	-0,108
					p=...	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,003	p=0,201	p=0,526	p=0,675	p=0,645	p=0,748	p=0,000	p=0,000
				IPE_max	1,000	0,000	0,000	0,000	0,633	-0,001	-0,018	-0,148	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561
					p=...	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,997	p=0,885	p=0,165	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000
				IPE_med	1,000	0,000	0,000	0,000	0,633	-0,001	-0,018	-0,148	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561	-0,561
					p=...	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139	p=0,139
				IPE_max	1,000	0,000	0,000	0,000	0,613	0,702	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238
					p=...	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000
				IPE_med	1,000	0,000	0,000	0,000	0,613	0,702	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238
					p=...	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000
				ITE_max	1,000	0,000	0,000	0,000	0,528	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475
					p=...	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000
				ITE_med	1,000	0,000	0,000	0,000	0,528	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475
					p=...	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000

É importante referir neste ponto do trabalho que as interpretações das relações entre variáveis, abaixo apresentadas, assentaram no pressuposto de que a variação encontrada nas formas através do espaço pode ser usada como uma representação da sua variação ao longo do tempo. Esta é a chamada *location-time substitution* (Piégay e Schumm, 2003; Brooks *et al.*, 2009). De acordo com esta premissa, e a título de exemplo, uma relação positiva entre comprimento e largura para uma hipotética forma do relevo implicaria que a largura aumenta à medida que as formas aumentam em comprimento.

A área e o perímetro (Ar e Pr), em paralelo com a forte associação mútua ($r=0,93$), mostram uma relação quase igualmente forte com a área de drenagem na desembocadura (Ad_{des} ; $r=0,92$ em ambos os casos). Esta associação está em consonância com os resultados já descritos para a literatura (vd. III.2.6), sugerindo ainda em maior grau do que nos exemplos revistos um controlo fundamental por parte da topografia (através da distribuição do escoamento superficial e subsuperficial) sobre o desenvolvimento das formas a longo prazo. Ao mesmo tempo, tanto Ar como Pr apresentam uma forte associação positiva ao indicador de sinuosidade adoptado ($Pr-Pcirc$; $r=0,78$ e $0,92$), sugerindo que as formas tendem a adquirir uma configuração mais sinuosa com o crescimento.

Para além destas relações, os resultados permitem associar as dimensões e a topografia pré-erosão. Ar , Pr e $Pr-Pcirc$ estão todas negativamente correlacionadas com o declive médio (Dec_{med} ; $r=-0,42$; $-0,51$ e $-0,43$), e positivamente correlacionadas com o Índice Topográfico de Encharcamento máximo (ITE_{max} ; $r=0,42$; $0,58$ e $0,54$) e médio (ITE_{med} ; $r=0,45$ e $0,47$ e $0,39$). Todas apresentam ainda uma fraca, mas significativa, correlação com o Índice de Potência do Escoamento máximo (IPE_{max} ; $r=0,25$; $0,36$ e $0,34$).

Este conjunto de associações sugere que as formas de maiores dimensões tendem a desenvolver-se, pelo menos parcialmente, em áreas cuja topografia promove a infiltração, por oposição a um escoamento superficial erosivo. De acordo com esta a noção, o aumento da sinuosidade com as dimensões será possivelmente o resultado da expansão e da bifurcação das cabeceiras promovidas pela água no rególito. A importância da infiltração no desenvolvimento das formas, em detrimento do escoamento à superfície, é adicionalmente sugerida pela total ausência de relação entre as dimensões e o Índice de Potência do Escoamento médio (IPE_{med}).

Em contraste com o declive médio, não foi possível relacionar as dimensões das formas com os outros parâmetros de forma topográfica antecedente (curvaturas) à excepção de uma muito fraca associação ($r=0,25$) entre a curvatura planar média (Cpl_{med}) e o perímetro.

No que diz respeito ao indicador de desenvolvimento utilizado (a razão entre a área real e a área de drenagem na desembocadura, Ar/Ad_{des}), é de salientar a falta de associação com Pr e Ar , indicando que as formas de maiores dimensões não estão necessariamente mais próximas de exceder a sua área de drenagem do que as formas menores. Ao mesmo tempo, verificou-se uma associação positiva entre Ar/Ad_{des} e a curvatura planar média e mínima (Cpl_{med} e Cpl_{min} ; $r=0,42$ e $0,24$) que, embora fraca, indica alguma tendência das formas mais desenvolvidas para ocupar áreas planarmente menos côncavas (onde a área de drenagem será tendencialmente menor). Esta ideia é espelhada pela fraca correlação negativa entre Ar/Ad_{des} e os índices topográficos adoptados (IPE_{med} ; ITE_{max} ; ITE_{med} ; $r=-0,30$; $-0,27$; $-0,25$), um reflexo da reduzida capacidade da topografia para concentrar escoamento no local destas formas.

Finalmente, é de salientar a fraca associação positiva encontrada entre Ar e distância à desembocadura (D_{des} ; $r=0,25$) e a total ausência de correlação entre Ar/Ad_{des} e D_{des} ambas contrariando a hipótese inicialmente colocada de um controlo por parte de mudanças no nível de base sobre o crescimento das formas (que seria confirmado por relações negativas).

Procurou-se por último aferir a possível importância da exposição dominante na diferenciação das características das formas. As Figuras 74 e 75 mostram, respectivamente, a relação entre área (Ar) e perímetro (Pr), e a relação entre área e sinuosidade ($Pr-Pcirc$)⁵⁴, ambas separadas por classe de exposição. A análise das figuras torna claro que não é possível atribuir qualquer diferenciação de padrões nas características em análise a esta variável.

3.2.1. Natureza das relações bivariadas

Para cada uma das relações bivariadas acima descritas, foi construído um gráfico de dispersão e analisado o ajustamento da relação a funções logarítmicas, potenciais e exponenciais comparando os valores dos respectivos coeficientes de determinação (R^2). Foram utilizadas para estas análises as funções do editor de gráficos do Microsoft Excel 2003. O conjunto de gráficos resultante é apresentado na Figura 76, juntamente com as equações que maximizam R^2 para cada par de variáveis. Nos casos em que estas equações não corresponderam à equação linear adoptada para estabelecer a correlação inicial (Tabela 57), o valor do coeficiente de determinação linear é também apresentado de forma a facilitar a comparação.

⁵⁴ Considerou-se redundante analisar a relação entre perímetro e sinuosidade, dada a elevada correlação deste com a área.

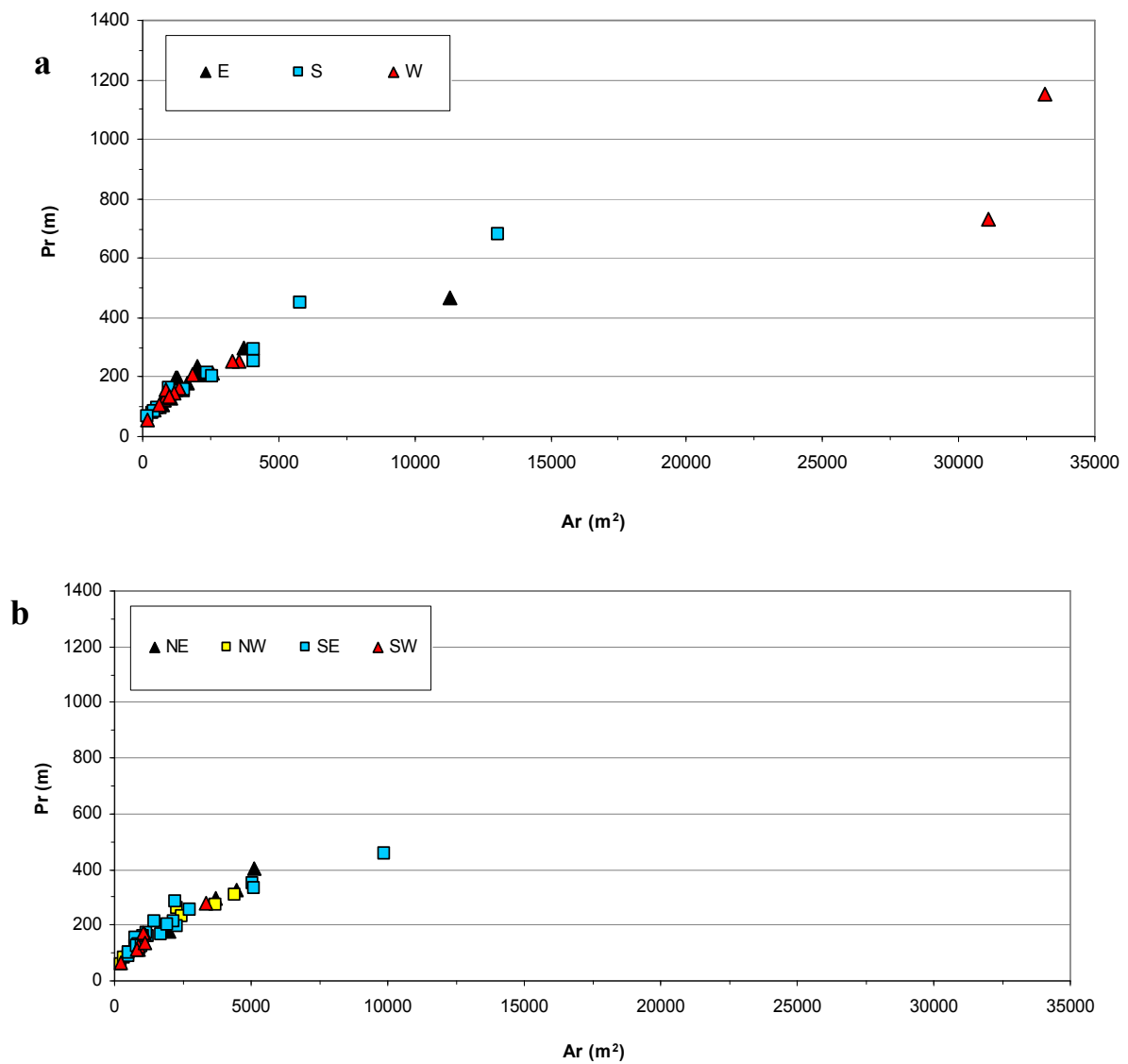


Figura 74 - Relação entre área (Ar) e perímetro (Pr), com as formas separadas por classe de exposição dominante: (a) direcções cardeais; (b) direcções colaterais. O único complexo de ravinas em topografia orientada a N (Ar : 324,2 m²; Pr : 85,5 m; Pr - P_{circ} : 21,66 m) não é perceptível em combinação com os restantes pontos de dados, pelo que não foi representado em (a).

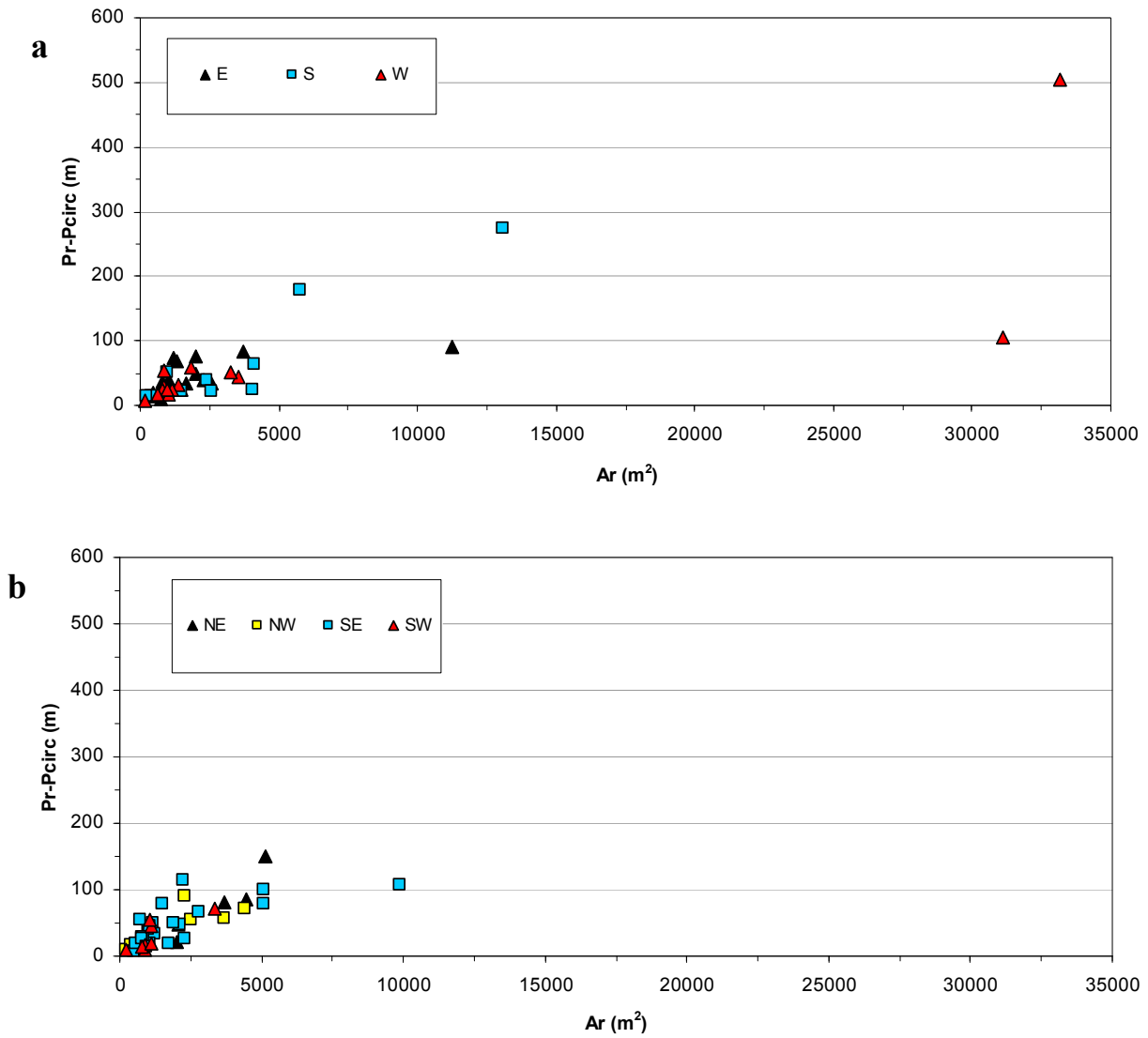
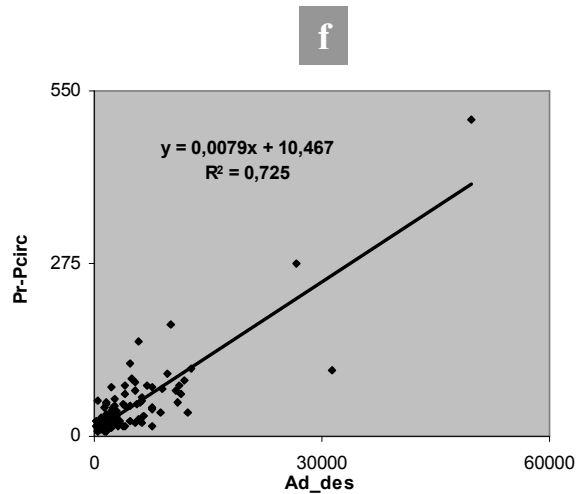
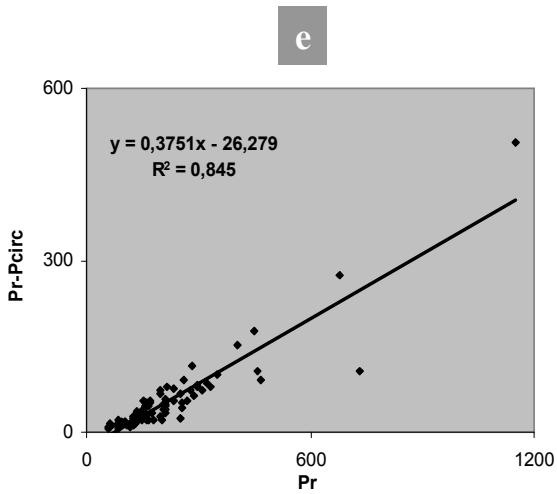
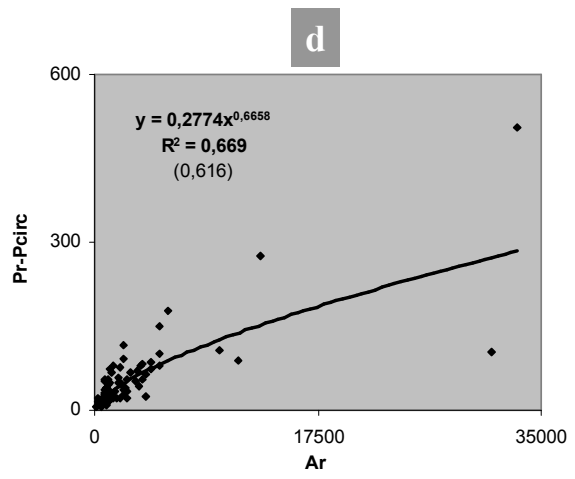
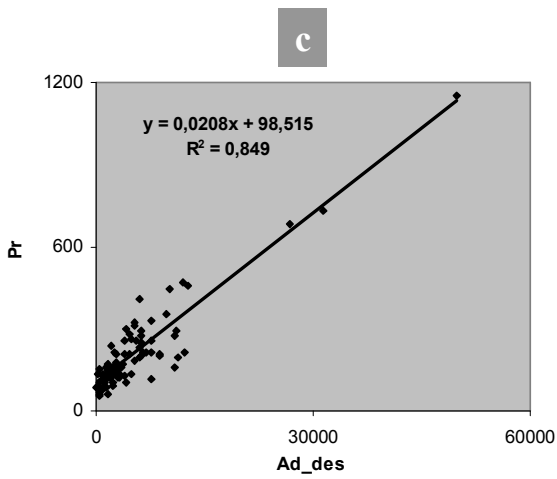
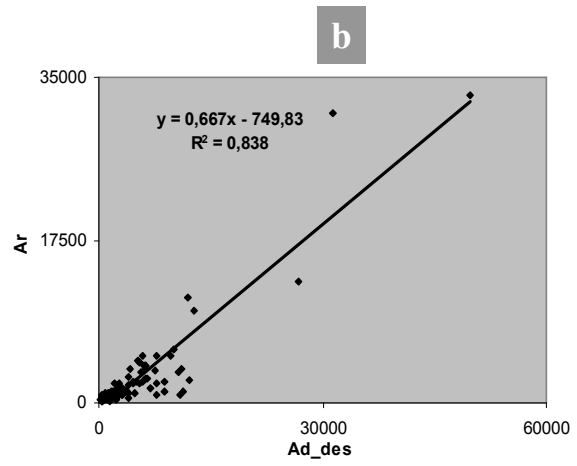
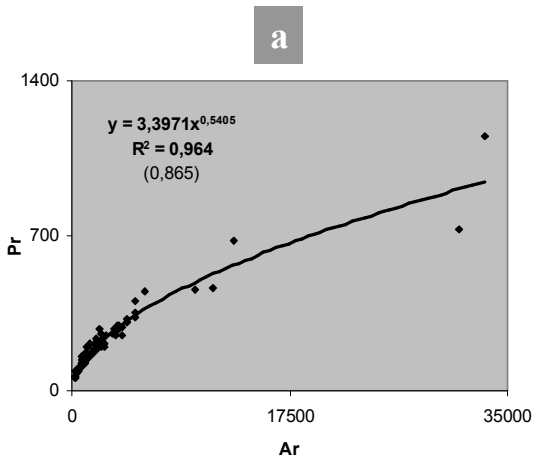
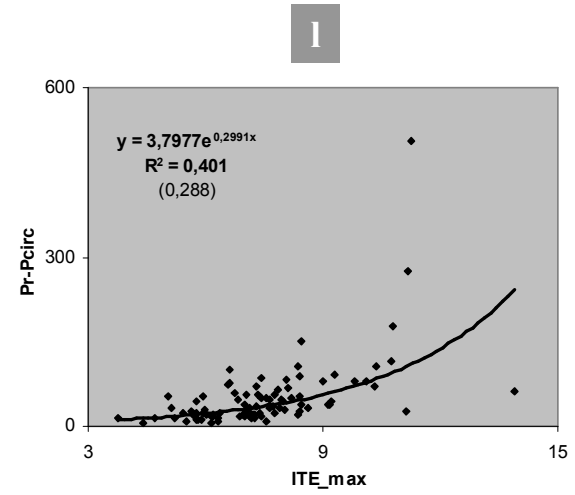
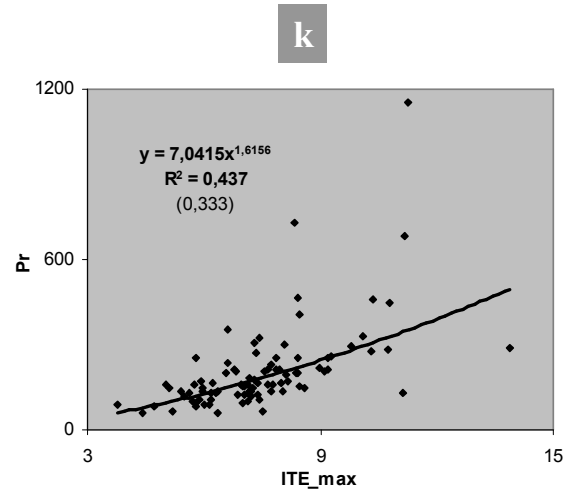
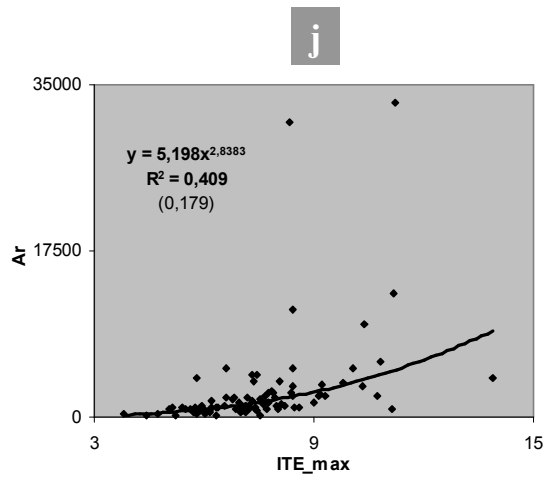
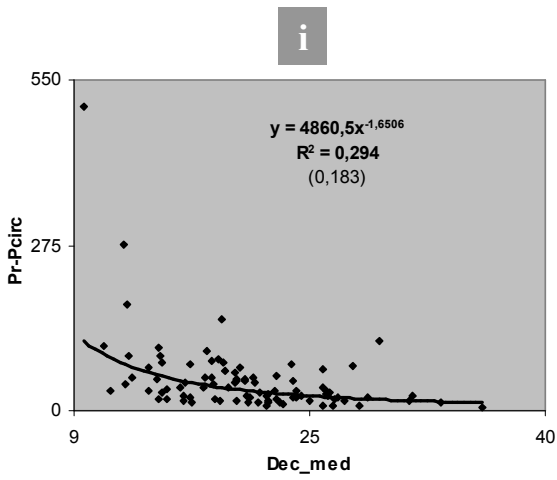
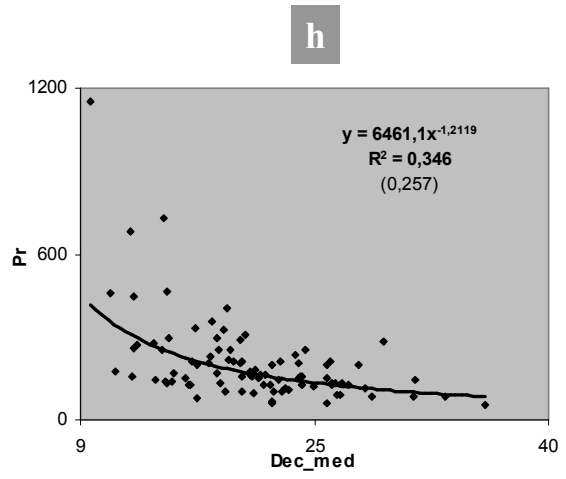
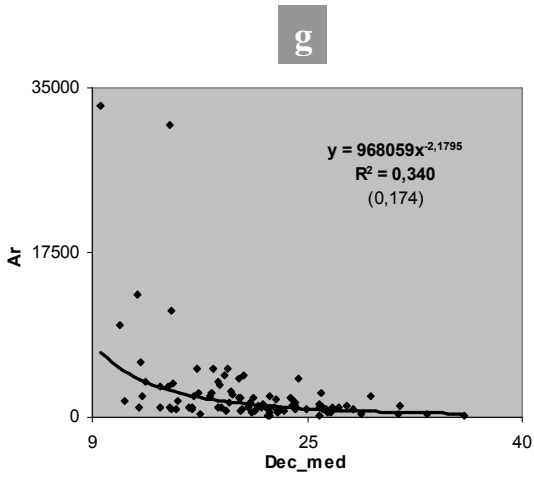
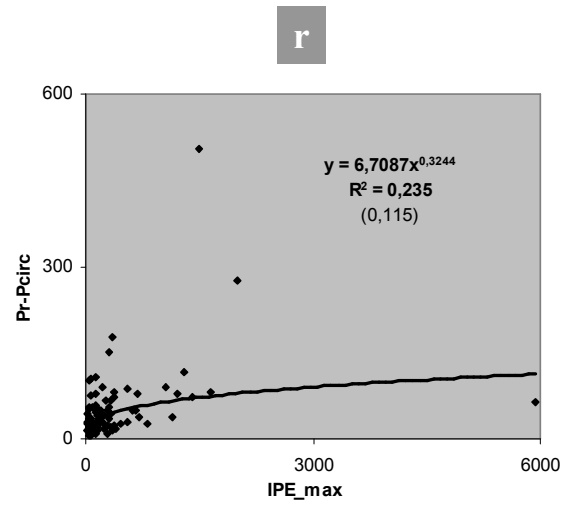
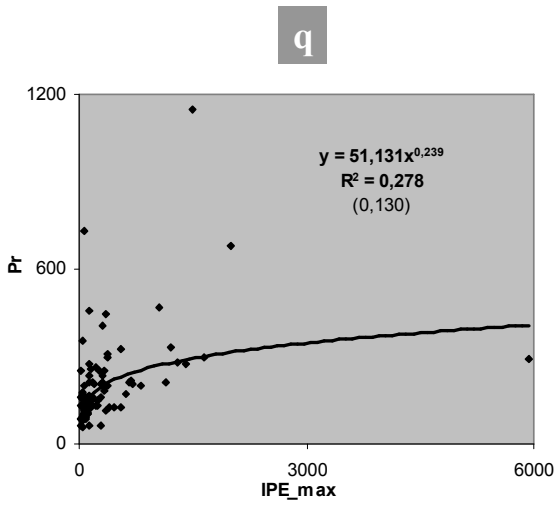
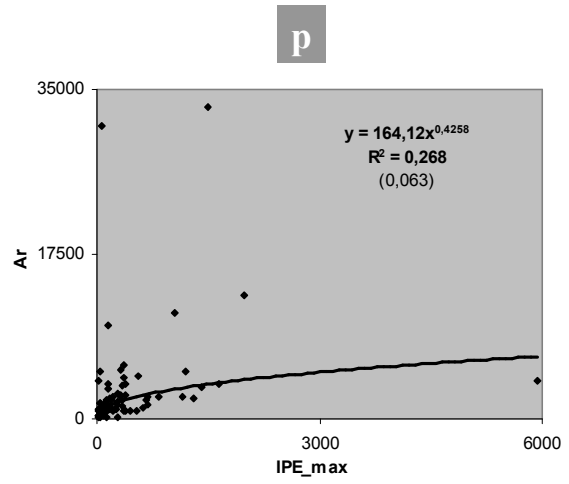
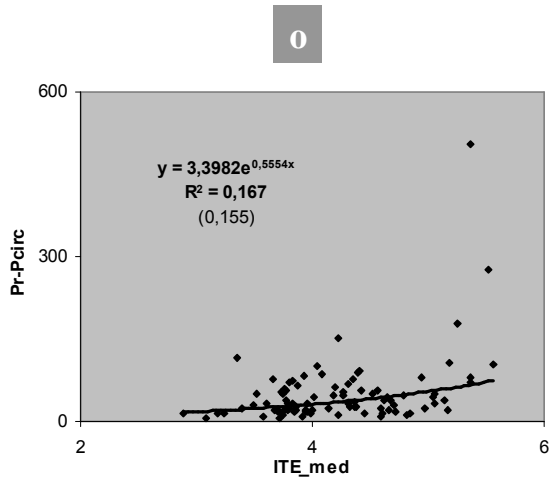
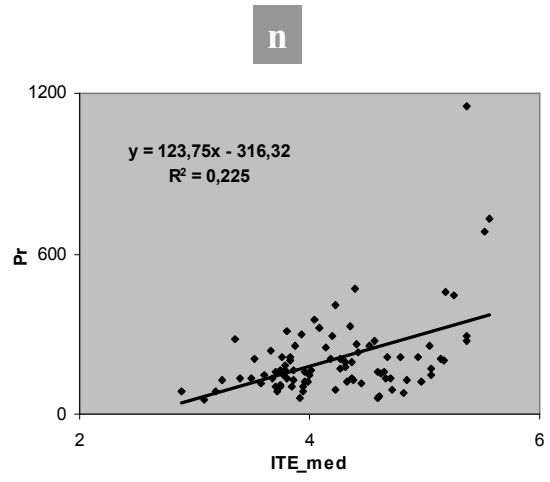
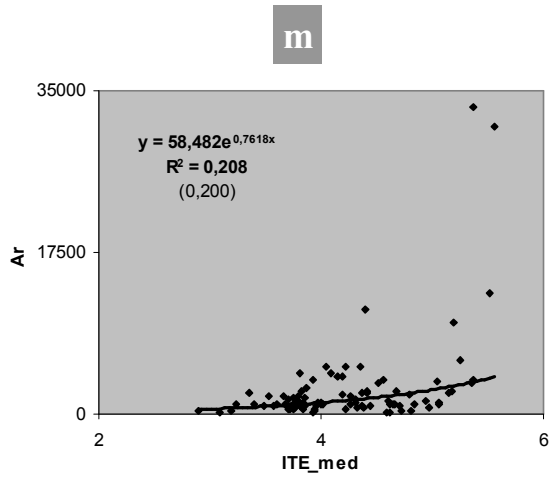
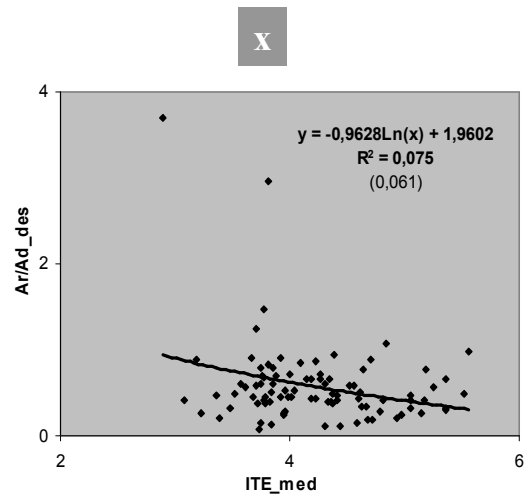
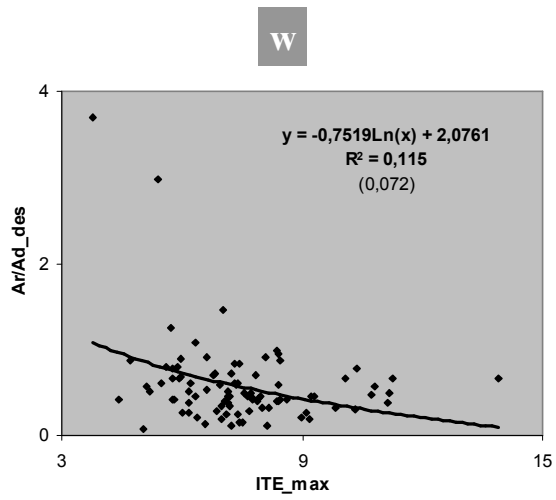
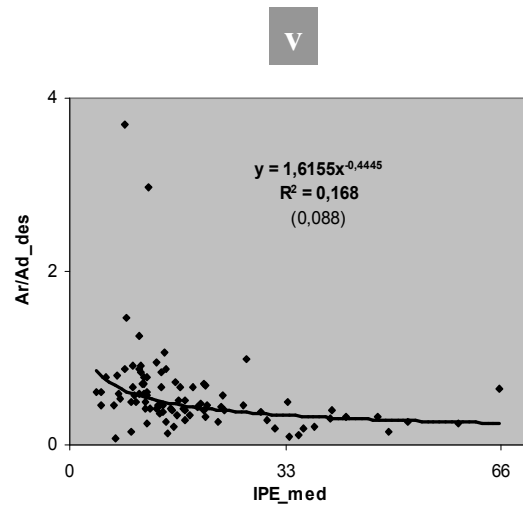
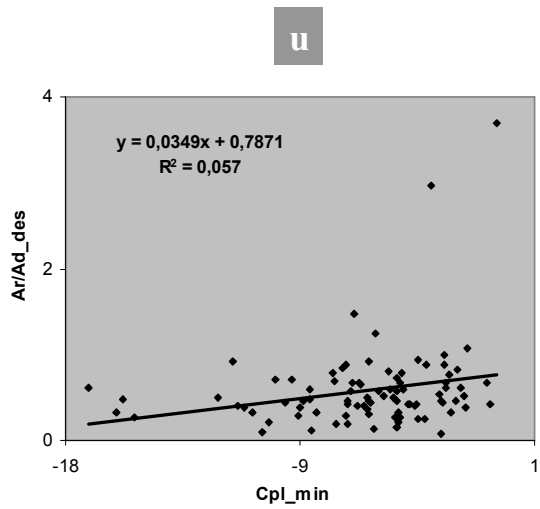
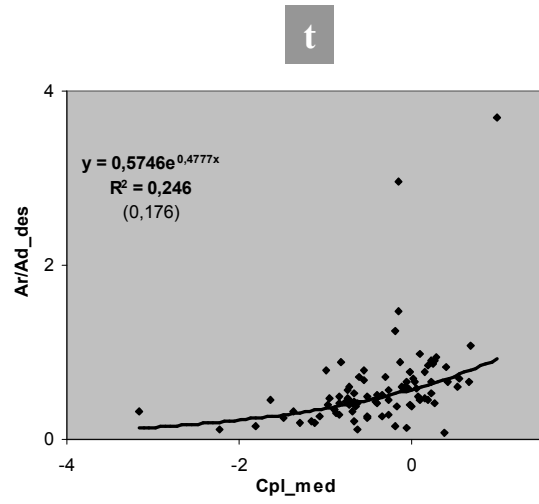
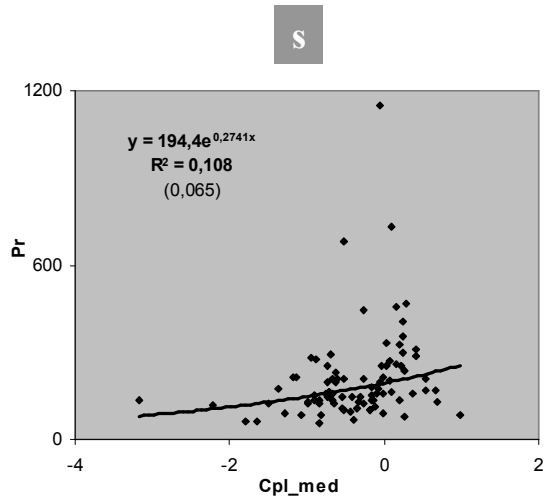


Figura 75 - Relação entre a área (Ar) e o indicador de sinuosidade utilizado ($Pr-Pcirc$), com as formas separadas por classe de exposição dominante: (a) direcções cardeais; (b) direcções colaterais. O único complexo de ravinas em topografia exposta a N não foi representado (vd. legenda Figura 74).









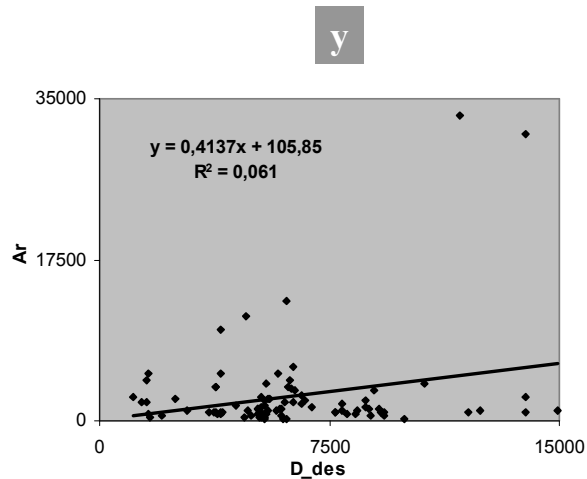


Figura 76 - Gráficos de dispersão para cada par de variáveis com correlações significativas considerado relevante. Os valores a negrito representam a equação com coeficiente de determinação (R^2) mais elevado, e o valor deste. Os valores entre parêntesis representam o coeficiente de determinação da equação linear inicial (i.e. o quadrado dos coeficientes de correlação já apresentados na Tabela 57), para os casos em que a equação óptima se revelou não-linear. As designações das variáveis nos eixos dos gráficos são as mesmas da Tabela 57.

A análise dos gráficos mostra que apenas sete das 25 relações analisadas se ajustam a equações lineares, com 11 a serem melhor descritas por funções potenciais, 5 por funções exponenciais, e 2 por funções logarítmicas. A mudança de funções levou a aumentos significativos dos coeficientes de determinação em vários casos, evidenciando as limitações de uma abordagem exclusivamente linear. Exemplos são a relação $Ar - ITE_{max}$ (R^2 de 0,179 para 0,409; a relação $Ar - IPE_{max}$ (0,063 para 0,268); ou $Ar - Dec_{med}$ (0,174 para 0,340). Uma síntese dos valores obtidos é apresentada na Tabela 58.

Tabela 58 - Coeficientes de determinação (R^2) obtidos após o ajustamento experimental de diferentes funções para representar as relações entre pares de variáveis. Os coeficientes lineares originais estão em *itálico*. As letras entre parêntesis descrevem o tipo de relação mais ajustada a cada par: (L) linear; (Lo) logarítmica; (P) potencial e (E) exponencial.

	Pr	D_des	Ad_des	Pr-Pcirc	Dec_med	ITE_max	ITE_med	IPE_Max	IPE_med	Cpl_min	Cpl_med
Ar	0,964(P)	0,061(L)	0,838(L)	0,669(P)	0,340(P)	0,409(P)	0,208(E)	0,268(P)			
	<i>0,865</i>	-----	-----	<i>0,616</i>	<i>0,174</i>	<i>0,179</i>	<i>0,200</i>	<i>0,063</i>			
Pr			0,849(L)	0,845(L)	0,346(P)	0,437(P)	0,225(L)	0,278(P)			0,108(E)
			-----	-----	<i>0,257</i>	<i>0,333</i>	-----	<i>0,130</i>			<i>0,065</i>
Ar/Ad_des						0,115(Lo)	0,075(Lo)		0,168(P)	0,057(L)	0,246(E)
						<i>0,072</i>	<i>0,061</i>		<i>0,088</i>	-----	<i>0,176</i>
Pr-Pcirc			0,725(L)		0,294(P)	0,401(E)	0,167(E)	0,235(P)			
			-----		<i>0,183</i>	<i>0,288</i>	<i>0,155</i>	<i>0,115</i>			

Considerando apenas as três variáveis morfológicas (Ar , Pr , $Pr-Pcirc$), o ajustamento de funções não-lineares sugere um padrão de desenvolvimento identificável. A Figura 76 (a) mostra que, após uma fase inicial, a expansão em termos de área passa a ser claramente dominante, com uma variação menor por parte do perímetro. O mesmo parece ocorrer com a sinuosidade ($Pr-Pcirc$), cuja relação com a área (Ar) foi reforçada pelo uso de uma função potencial (Figura 76 (d)), embora a dispersão dos valores seja considerável. As mudanças na relação área-perímetro com o crescimento das formas são postas em evidência se compararmos a razão Pr/Ar com Ar num gráfico de dispersão (Figura 77), mostrando uma relação claramente potencial.

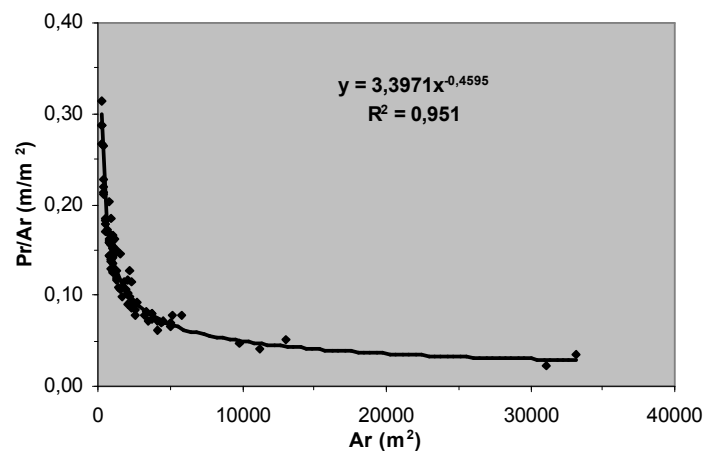


Figura 77 - Gráfico de dispersão relacionando a área das formas (Ar) com a razão perímetro/área (Pr/Ar). São mostrados a equação da função potencial ajustada e o respectivo coeficiente de determinação (R^2).

A relação entre a área de drenagem na desembocadura (Ad_{des}) e as três variáveis morfológicas adoptadas (Ar , Pr , $Pr-Pcirc$) é comprovadamente linear (Figura 76 (b), (c), (f)) sugerindo um controlo constante ao longo do tempo, e não transições de processos ou perdas de transmissão de água ao longo das áreas de drenagem de maiores dimensões conforme sugerido por Vandekerckhove *et al.* (2000b: 54) no SE de Espanha com base em relações potenciais.

A correlação negativa inicial entre Ar , Pr e $Pr-Pcirc$ e o declive médio da superfície topográfica antecedente (Dec_{med}), ficou mais forte, nos três casos devido ao ajustamento de funções potenciais (Figura 76 (g), (h), (i)). O declive explica agora cerca de um terço da variância das três variáveis, reforçando a noção de que as formas maiores entalharam áreas relativamente pouco declivosas.

Ar, *Pr* e *Pr-Pcirc* também se encontram agora mais fortemente correlacionadas com *ITE_max*, *ITE_med* e *IPE_max* (Figura 76 (j) a (r)), confirmando a relação entre o crescimento das formas e a propensão da topografia para a acumulação do escoamento. Destas relações, são de salientar *ITE_max* e *IPE_max*, que aumentaram muito os coeficientes de determinação. Em função da adopção de novas funções, sobretudo potenciais⁵⁵, *ITE_max* passou a explicar mais de 40% da variância na área, perímetro e sinuosidade das formas, com *IPE_max* a explicar cerca de 25%. Se se considerar que os valores mais elevados de *ITE* ocorrem tendencialmente na desembocadura das formas e se assumir ao mesmo tempo esse local como ponto de iniciação, a importância de *ITE_max* sugere que a quantidade de água que se concentra na(s) cabeceiras para originar gradientes hidráulicos acentuados e promover movimentos de massa é um factor crítico desde uma fase inicial do desenvolvimento.

Os valores irrelevantes de correlação verificados entre as dimensões e o Índice de Potência do Escoamento médio sugerem que o fluxo superficial não terá mais do que um papel subsidiário no crescimento das formas a longo prazo, ao remover material depositado por colapsos nas paredes e cabeceira. O facto, porém, de os valores máximos de *IPE*, considerados significativos, ocorrerem tendencialmente nos sectores correspondentes à desembocadura das formas (presumível ponto de iniciação) e não nos sectores montante sugere que o entalhe terá tido o seu papel máximo numa fase inicial.

É de notar neste ponto que as regressões realizadas tiveram como variáveis dependentes apenas as dimensões (*Ar*, *Pr*) e a sinuosidade das formas (*Pr-Pcirc*), pelo que os resultados não permitem aferir a importância das diferentes variáveis independentes no seu surgimento⁵⁶. No que diz respeito ao indicador de desenvolvimento utilizado (razão entre a área das formas e a sua área de drenagem na desembocadura, ou *Ar/Ad_des*), há um aumento da associação à curvatura planar média (*Cpl_med*), com esta variável agora a explicar 24,6% de *Ar/Ad_des* (Figura 76 (t)). Este valor apenas confirma que as formas maiores em relação às respectivas áreas de drenagem tendem a ocupar vertentes de curvatura planar nula e mesmo convexas (como pode ser observado pelos valores de *Cpl_med* superiores a 0).

Finalmente, é de salientar que, apesar de a litologia não ter sido considerada nesta fase do trabalho, a análise visual das relações entre as variáveis não sugere a existência de contrastes litológicos com expressão nos processos erosivos, que seriam indicados pela existência de aglomerações distintas de pontos nos gráficos. Em vez disso, as relações entre *Ar* e *Pr* e entre

⁵⁵ A excepção é a função exponencial utilizada na relação *ITE_max* - *Pr-Pcirc* (Figura 76 (l)).

⁵⁶ Os controlos sobre o surgimento (expresso como uma variável dicotómica de forma a distinguir a presença da ausência de formas) são considerados mais à frente com recurso à regressão logística (vd. III.3.3.2).

estas variáveis e o indicador de sinuosidade adoptado (*Pr-Pcirc*) (Figura 76 (a), (d), (e)) mostram um único padrão, mais ou menos difuso.

3.3 Modelação

Após a selecção das variáveis apresentando correlações mais fortes com as três propriedades dos complexos de ravinhas em estudo, procurou-se investigar até que ponto o seu contributo pode ser conjugado em modelos quantitativos. Optou-se por aplicar duas técnicas de modelação, com pressupostos e capacidades diferentes: a regressão linear múltipla (RLM) e a regressão logística (RLG). As duas foram conjugadas com o propósito de explorar a sua complementaridade: a RLM foi primeiramente utilizada para procurar explicar as dimensões das formas e a sua sinuosidade, enquanto a RLG foi aplicada a fim de averiguar a capacidade das variáveis em estudo para explicar a localização das formas nas respectivas bacias.

3.3.1. Dimensões e sinuosidade: regressão linear múltipla

A regressão linear é uma técnica amplamente utilizada na literatura (e.g. Gutiérrez *et al.*, 1997; Vandekerckhove *et al.*, 2000b; 2001; Boardman *et al.*, 2003; Capra *et al.*, 2005; Buccolini *et al.*, 2012; El Maaoui *et al.*, 2012) e consiste na modelação das relações entre uma variável dependente Y e p variáveis independentes X_i ($i=2,\dots,p$) com base numa série de n valores conhecidos. É formulada como:

$$Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_p \cdot X_p + e \quad (j=1,\dots,n)$$

sendo a a ordenada na origem ou intercepto, b_i os coeficientes de regressão, e e o erro (ou resíduo) do modelo. Partindo de um conjunto de valores conhecidos, os coeficientes de regressão e o intercepto são estimados através da minimização da soma dos quadrados dos erros resultantes do modelo. Sendo e_j a diferença entre um dado valor observado Y_{oj} e o valor estimado Y_{ej} para a unidade de análise de índice j , são definidos o intercepto e os coeficientes que minimizam os quadrados das diferenças entre valores observados e estimados:

$$\sum_{j=1}^n (Y_{oj} - Y_{ej})^2$$

Algoritmos para levar a cabo este processo de minimização são implementados automaticamente pelos *softwares* de análise estatística. A formulação matemática implicada é dada por Maroco (2007: 565), e não foi aqui reproduzida.

A natureza linear desta técnica implica um conjunto de pressupostos sobre as variáveis em análise, sobre os quais a sua aplicabilidade assenta. Em primeiro lugar, e como a própria

denominação indica, é assumido que as variáveis em análise se relacionam de forma linear entre si. Embora os resultados não sejam grandemente afectados por pequenos desvios a esta norma (Hill e Lewicki, 2006: 346), as variáveis com relações claramente não-lineares (e.g. potenciais, exponenciais) podem ser transformadas mediante conversão para logaritmos de forma a ajustarem-se a um padrão linear. Em segundo lugar, é assumido que as variáveis independentes são ortogonais, i.e. não apresentam correlação entre si, ou fazem-no apenas de forma fraca (Maroco, 2007: 563). Em terceiro lugar, é assumido que os erros, ou resíduos, são aleatórios e apresentam distribuição normal (Hill e Lewicki, 2006: 346). A validação destes pressupostos com relação aos modelos obtidos é apresentada mais à frente.

Aplicação e resultados

Começou-se por seleccionar aleatoriamente 60 das 90 formas a fim de servirem de base para a modelação. As restantes 30 foram utilizadas para validar independentemente os modelos gerados.

Com base nos valores na Tabela 58, foi seleccionado o conjunto de variáveis com maior poder explicativo relativamente a *Ar*, *Pr* e *Pr-Pcirc*. Foram escolhidas apenas variáveis susceptíveis de representar factores de causa das variáveis a modelar (i.e. *Pr* não foi usado como variável independente em relação a *Ar*, e vice-versa), de acordo com o objectivo de compreender os controlos sobre as características das formas em estudo.

Dada a já referida natureza linear desta técnica de regressão, foi necessário efectuar transformações nas variáveis cujos valores apresentaram relações não lineares de forma a permitir a sua inserção no modelo com a mínima perda de poder explicativo. No presente caso, porém, estas transformações originaram a necessidade de tomar uma opção: dado que se verificaram diferentes tipos de relações entre as mesmas variáveis a inserir num mesmo modelo e a linearização de relações potenciais e exponenciais implica a conversão para logaritmos de variáveis independentes e dependentes (Maroco, 2007: 581), impôs-se a decisão de optar por privilegiar as relações lineares (não convertendo a dependente nem as independentes com ela relacionadas linearmente) ou não-lineares (convertendo a dependente e as independentes com ela relacionadas não-linearmente). Optou-se assim por experimentar as duas possibilidades existentes face a cada variável dependente a modelar, a fim de seleccionar os modelos com maior capacidade explicativa. Em qualquer um dos casos, lidou-se com as variáveis independentes com relações contrárias às privilegiadas em cada modelo (lineares vs. não-lineares) convertendo-as ou não para logaritmos de forma a maximizar a sua relação com

a dependente. A título de exemplo (e conforme os valores na Tabela 59), começou-se por modelar Ar enquanto função de Ad_des , ITE_max , ITE_med , Dec_med e IPE_max , privilegiando as relações não lineares. A dependente e as independentes com as quais mantém relações não-lineares (todas excepto Ad_des , cf. Tabela 58) foram convertidas para logaritmos. No caso específico de Ad_des , que se relaciona linearmente com Ar , analisaram-se os coeficientes de determinação face a Log_Ar (a dependente convertida) convertendo os valores de Ad_des para logaritmos ($R^2=0,66$) e não convertendo ($R^2=0,55$), e optando-se depois pela hipótese que maximizou R^2 .

Foram tidos em conta no processo de modelação os vários pressupostos do modelo de regressão linear múltipla. Apesar de o pressuposto de linearidade não poder ser totalmente cumprido, a conversão para logaritmos das variáveis com relações não-lineares (Figura 76 e Tabela 58) teve como efeito aproximá-las de uma configuração linear⁵⁷.

A possibilidade de correlações fortes entre as variáveis independentes (i.e. multicolinearidade) foi considerada através do *Variance Inflating Factor* (VIF). Este indicador é formulado como $1/(1-R^2)$, em que R^2 é o coeficiente de determinação de um modelo obtido usando a variável independente em consideração como dependente face a todas as outras independentes. Quanto menor for a parte da sua variância explicada por este modelo, mais próximo de 1 será o denominador da expressão, e menor será o VIF (cujo valor mínimo é 1). De uma forma geral, valores superiores a 5 ou mesmo 10 indicam problemas de multicolinearidade (Maroco, 2007: 603).

A normalidade dos resíduos foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov, aplicado aos resíduos de cada regressão. Sempre que o teste permitiu rejeitar a hipótese de normalidade para $\alpha=0,05$, os resíduos foram padronizados, e foi eliminada do conjunto de dados a forma com maior desvio face à média, entendida como *outlier*⁵⁸ (cf. Hill e Lewicki, 2007: 347), sendo depois efectuada nova regressão e análise dos resíduos. Este processo foi realizado até não ser possível rejeitar a hipótese de normalidade, e foi necessário apenas com relação a Ar . Notar que neste caso e após a eliminação dos *outliers*, a regressão foi realizada com todas as variáveis independentes iniciais, ou seja, não foi influenciada pelos resultados da primeira regressão com Ar como dependente.

⁵⁷ Maroco (2007: 581) apresenta formas de linearizar funções não lineares, associando a conversão para logaritmos naturais às funções exponenciais, e o uso de logaritmos de base 10 para relações potenciais. No presente caso, experimentaram-se ambas as transformações nas relações exponenciais, não se observando qualquer diferença nos coeficientes de determinação resultantes. Assim, optou-se por converter todas as funções não-lineares para logaritmos de base 10.

⁵⁸ Entre as quatro unidades de análise eliminadas, o valor mínimo de resíduo padronizado observado foi de 2,46, excedendo largamente a diferença de 2 desvios-padrão face à média tipicamente adoptada para que um valor seja considerado *outlier* (e.g. Maroco, 2007: 584).

Foi usado o SPSS 15.0 em todas as análises, com o método *Stepwise* para a entrada de variáveis. O algoritmo associado começa por integrar apenas o intercepto no modelo, sendo as variáveis inseridas sucessivamente e começando com aquela cuja associação ao modelo produz o valor da estatística de teste F mais elevado⁵⁹. É seguido depois o critério de introduzir a cada passo a variável com um F parcial mais elevado (i.e. um F calculado após retirados os efeitos das outras independentes já integradas no modelo). Para que cada variável possa ser integrada, o seu valor de F parcial tem de ser igual ou superior a um valor crítico definido pelo utilizador. Por outras palavras, a probabilidade de se rejeitar a Hipótese nula do teste F (de que o coeficiente de correlação múltipla parcial em questão é igual a 0) sendo ela verdadeira deve ser inferior a uma margem de erro crítica.

O utilizador também define um F crítico para a saída de variáveis: após a entrada de cada variável no modelo, o algoritmo calcula o F parcial de todas e exclui aquela cujo valor desça abaixo do valor crítico estabelecido. O método *stepwise* apresenta assim a vantagem de remover as variáveis cuja importância no modelo é reduzida pela entrada de outras (Maroco, 2007: 609). Na presente aplicação, utilizando as margens de erro associadas a F em vez dos valores das estatísticas de teste, definiu-se uma margem de erro de 5% ($\alpha=0,05$) como mínima para a inserção de cada variável, e uma margem de 10% como máxima para a sua remoção.

Os resultados iniciais obtidos para cada variável dependente são sintetizados nas Tabelas 59, 61 e 62. Os resultados após eliminação de *outliers* em ordem a satisfazer os pressupostos da RLM (apenas para Ar), são apresentados na Tabela 60.

Finalmente, foi realizada a validação dos modelos com melhor ajustamento aos dados recorrendo às 30 formas anteriormente seleccionadas. As três equações, bem como o seu ajustamento aos valores do conjunto de validação, são apresentadas na Tabela 63.

Os resultados mostram que é possível explicar a grande maioria da variação nas dimensões das formas em análise com recurso apenas à área de drenagem na desembocadura. O declive médio (Log_Dec_med), e o Índice Topográfico de Encharcamento (ITE_med) permitem explicar apenas uma parte residual da variância no perímetro (R^2 parciais de apenas 3,2% e 2,6%; Tabela 61), e o mesmo ocorre com ITE_max e ITE_med em relação ao indicador de sinuosidade adoptado ($Pr-Pcirc$), com percentagens da variância explicada de, respectivamente, 4,2 e 2,6% (Tabela 62). Nenhuma variável além de Ad_des se mostrou significativa na modelação da área (Ar) (Tabela 60).

⁵⁹ O SPSS permite ao utilizador definir um F crítico ou, de forma inversamente proporcional, a margem de erro associada a esse valor de F (o seu p -value). Esta margem de erro é designada *probability of F* pelo *software*.

É aqui importante referir que, se *Ad_des* mantém nas equações de regressão uma correlação positiva com as dimensões (tal como observado em termos bivariados na Tabela 57), o mesmo ocorrendo com *ITE_Max* em relação ao perímetro, ocorre o inverso com *ITE_Med*. Esta variável mostrou-se positivamente correlacionada com *Pr* e *Pr-Pcirc* em termos bivariados (Tabela 57 e Figura 76 (n) e (o)), mas apresenta agora nas equações de regressão coeficientes negativos face a estas propriedades. Não foi possível compreender as razões para esta inversão do sentido da correlação, um problema minimizado pela proporção marginal da variância que *ITE_Med* explica (2,6% em relação a *Pr* e a *Pr-Pcirc*).

Tabela 59 - Resultados das regressões tendo a área das formas *Ar* como variável dependente. Valores entre parêntesis a seguir à identificação das variáveis independentes são os coeficientes de determinação bivariados face a *Ar*. VIF - *Variance Inflating Factor*. K-S - Margem de erro associada à rejeição da hipótese de normalidade dos resíduos definida pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (valores $\leq 0,05$ considerados significativos); R^2 - Coeficiente de determinação múltiplo. A equação mais ajustada aos dados está identificada pela célula a cinzento.

V.Dep.		Variáveis independentes testadas							
Ar		Ad_des (0,838); ITE_max (0,409); Dec_med (0,340); IPE_max(0,268); ITE_med (0,208)							
Método		b	β	sig.	VIF	R ² parcial	K-S	R ²	
Dependente convertida para Log (n=60)	F=49,553	-----	-----	-----	0,000	-----	-----		
	Intercepto	-----	3,617	-----	0,000	----	-----		
	V. Seleccionadas	Log_Ad_des	0,725	0,777	0,000	1,626	0,648		
		Log_Dec_med	-1,41	-0,357	0,000	1,716	0,045	0,757	0,726
		Log_ITE_med	-1,886	-0,256	0,012	1,977	0,033		
	V. excluídas	<i>Log_ITE_max</i>	----	-0,065	0,636	3,789	----		
		<i>Log_IPE_max</i>	----	0,019	0,850	2,037	----		
Dependente com valores originais (n=60) ⁶⁰	F=118,600	-----	-----	-----	0,000	----	-----		
	Intercepto	-----	3288,801	-----	0,010	----	-----		
	V. Seleccionadas	Ad_des	0,781	0,973	0,000	1,232	0,765		
		Log_IPE_max	-2083,309	-0,227	0,001	1,232	0,042	0,028	0,806
	V. excluídas	<i>ITE_max</i>	----	-0,17	0,875	3,232	----		
		<i>Log_Dec_med</i>	----	-0,55	0,401	1,222	----		
		<i>ITE_med</i>	----	-0,300	0,685	1,544	----		

⁶⁰ A soma dos coeficientes de regressão múltipla parciais difere do valor total por 0,001. Os valores apresentados são exactamente os do *output* da análise de regressão dado pelo SPSS 16.0, pelo que a diferença deverá ser resultado de arredondamentos estabelecidos no algoritmo do *software*.

Tabela 60 - Resultados da regressão tendo como variável dependente *Ar*, e cumprindo o pressuposto da normalidade dos resíduos. O processo implicou a eliminação progressiva das unidades de análise com resíduos mais afastados da média (considerados *outliers*), até não ser possível rejeitar a hipótese de normalidade do resíduo com uma margem de erro $\leq 0,05$ num teste de Kolmogorov-Smirnov. Formas eliminadas e respectivos resíduos padronizados, por ordem de eliminação: forma 41 (3,53), 30 (-2,75), 19 (-252) e 7 (2,46). Notar que, após a eliminação dos quatro *outliers*, a variável *Log_IPE_max* já não é significativa de acordo com a margem de erro adoptada.

V.Dep.		Variáveis independentes testadas							
Ar		Ad_des (0,838); ITE_max (0,409); Dec_med (0,340); IPE_max(0,268); ITE_med (0,208)							
Método			b	β	sig.	VIF	R ² parcial	K-S	R ²
Dependente com valores originais (n=56)	F=188,525	----	----	----	0,000	----	----	0,111	0,777
	Intercepto	----	-1,068	----	0,996	----	----		
	V. Seleccionadas	Ad_des	0,461	0,882	0,000	1,000	----		
	V.Excluídas	<i>Log_IPE_max</i>	----	-0,160	0,051	1,647	----		

Tabela 61 - Resultados das regressões tendo o perímetro das formas *Pr* como variável dependente. Valores entre parêntesis a seguir à identificação das variáveis independentes são os coeficientes de determinação bivariados face a Pr. VIF - *Variance Inflating Factor*; K-S - Margem de erro associada à rejeição da hipótese de normalidade dos resíduos definida pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (valores $\leq 0,05$ considerados significativos); R² - Coeficiente de determinação múltiplo. A equação mais ajustada aos dados está identificada pela célula a cinzento.

V.Dep.		Variáveis independentes testadas							
Pr		Ad_Des (0,849); ITE_max (0,437); Dec_med (0,346); IPE_max (0,278); ITE_med (0,225)							
Método			b	β	sig.	VIF	R ² parcial	K-S	R ²
Dependente convertida para Log (n=60)	F=46,478	----	----	----	0,000	----	----	0,954	0,713
	Intercepto	----	2,245	----	0,000	----	----		
	V. Seleccionadas	Log_Ad_des	0,377	0,756	0,000	1,613	0,640		
		Log_Dec_med	-0,731	-0,346	0,000	1,688	0,047		
		ITE_med	-0,091	-0,224	0,028	1,915	0,026		
	V. excluídas	<i>Log_ITE_max</i>	----	0,017	0,904	3,745	----		
<i>Log_IPE_max</i>		----	0,030	0,770	2,026	----			
Dependente com valores originais (n=60)	F=125,012	----	----	----	0,000	----	----	0,823	0,870
	Intercepto	----	752,485	----	0,000	----	----		
	V. Seleccionadas	Ad_des	0,021	0,900	0,000	1,496	0,812		
		Log_Dec_med	-345,680	-0,300	0,000	1,623	0,032		
		ITE_med	-49,622	-0,224	0,002	1,957	0,026		
	V. excluídas	<i>ITE_max</i>	----	0,091	0,211	2,270	----		
<i>Log_IPE_max</i>		----	0,069	0,211	1,312	----			

Tabela 62 - Resultados das regressões tendo a sinuosidade das formas *Pr-Pcirc* como variável dependente. Valores entre parêntesis a seguir à identificação das variáveis independentes são os coeficientes de determinação bivariados face a *Pr-Pcirc*. VIF - *Variance Inflating Factor*. K-S - Margem de erro associada à rejeição da hipótese de normalidade dos resíduos definida pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (valores $\leq 0,05$ considerados significativos); R^2 - Coeficiente de determinação múltiplo. A equação mais ajustada aos dados está identificada pela célula a cinzento.

V.Dep.	Variáveis independentes testadas									
Pr-Pcirc	Ad_Des (0,725); ITE_max (0,401); Dec_med (0,294); IPE_max (0,235); ITE_med (0,167)									
Método			b	β	sig.	VIF	R ² parcial	K-S	R ²	
Dependente convertida para Log (n=60)	F=27,528		----	----	----	0,000	----	----		
	Intercepto		----	1,141	----	0,065	----	----		
	V. Seleccionadas	Log_Ad_Des		0,384	0,544	0,000	1,346	0,447		
		Log_Dec_med		-0,731	-0,245	0,029	1,346	0,045	0,695	0,491
	V. excluídas	<i>Log_ITE_max</i>		---	0,209	0,247	3,590	----		
		<i>Log_IPE_max</i>		---	0,058	0,664	1,985	----		
		<i>Log_ITE_med</i>		----	-0,213	0,109	1,977	----		
Dependente com valores originais (n=60)	F=32,661		----	----	----	0,000	----	----		
	Intercepto		----	10,391	----	0,716	----	----		
	V. Seleccionadas	Ad_Des		0,005	0,655	0,000	1,744	0,568		
		ITE_max		10,414	0,364	0,002	2,013	0,042	0,740	0,636
		ITE_med		-15,270	-0,220	0,050	1,853	0,026		
	V. excluídas	<i>Log_Dec_med</i>		---	-0,202	0,064	1,830	----		
		<i>Log_IPE_max</i>		----	-0,123	0,346	2,564	----		

Tabela 63 - As três equações de regressão melhor ajustadas aos dados de modelação (identificadas por células de fundo cinzento nas tabelas 60, 61 e 62) e o seu ajustamento aos valores dos 30 complexos de ravinas independentes. R^2 - coeficientes de determinação entre os valores das formas e as previsões dos modelos. Erro médio (%) - Média do erro absoluto da previsão por forma, dado como percentagem do valor real da forma.

Variável	Equação	R ²	Erro médio (%)
Ar	<i>Ar</i> = -1,068 + 0,461 . <i>Ad_des</i>	0,93	51,1
Pr	<i>Pr</i> = 752,485 + 0,021 . <i>Ad_des</i> - 345,680 . <i>Log_Dec_med</i> - 49,622 . <i>ITE_med</i>	0,88	21,3
Pr_Pcirc	<i>Pr-Pcirc</i> = 10,391 + 0,005 . <i>Ad_des</i> + 10,414 . <i>ITE_max</i> - 15,270 . <i>ITE_med</i>	0,81	62,2

Finalmente, e no que diz respeito à validação dos modelos com recurso ao conjunto de 30 formas independentes, os resultados permitem duas observações (Tabela 63). Por um lado, as distribuições de valores previstos e de valores reais ajustam-se bastante bem, com uma grande parte da proporção das variâncias em comum (93%, 88% e 81%, respectivamente para Ar, Pr e Pr-Pcirc). Por outro, a capacidade concreta dos modelos construídos para prever os valores reais é pouco satisfatória, com erros médios muito elevados. Conforme a Tabela 63 mostra, as diferenças absolutas entre valores reais e previstos correspondem em média a 51,1%, 21,3% e 62,2% dos valores reais.

Em suma, os resultados mostram que a área de drenagem na desembocadura, traduzindo a quantidade de água disponível a partir de montante, é claramente uma propriedade crítica no desenvolvimento geral dos complexos de ravinas estudados, contrastando com as influências marginais do declive e do Índice Topográfico de Encharcamento. Por outro lado, é evidente que esta variável permite apenas prever os padrões gerais de evolução, sinalizando claramente a existência de outros factores de controlo cuja consideração será muito relevante numa abordagem menos generalizada.

3.3.2. Distribuição das formas: regressão logística

A regressão logística tem como uma característica fundamental o facto de adoptar como dependentes variáveis qualitativas, por oposição a quantitativas. Neste contexto, faz parte da classe mais ampla de técnicas denominadas regressão categorial, adoptando o nome de logística quando a dependente é nominal dicotómica, e de regressão multinomial (uma extensão da logística) quando esta é nominal policotómica. Nos casos em que as classes da variável dependente podem ser ordenadas, designa-se regressão ordinal (Maroco, 2007: 683). No presente caso, a variável dependente considerada foi a presença/ausência de complexos de ravinas, claramente nominal dicotómica.

A função logística permite estimar a probabilidade de ocorrência de uma instância de referência (neste caso 1 por oposição a 0) da variável dicotómica y em estudo, como resultado dos valores de p variáveis independentes, podendo estas ser qualitativas ou quantitativas:

$$P(y = 1) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p)}$$

Esta função, cujos resultados são valores entre 0 e 1, é linearizada com recurso à denominada transformação *Logit*, adoptando a forma:

$$\ln\left(\frac{P(y = 1)}{1 - P(y = 1)}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p$$

É de notar que o resultado desta função (também denominado *Logit*) é o logaritmo natural da razão entre a probabilidade de ocorrência da instância considerada (1) por oposição à sua não ocorrência (0), ou seja, o logaritmo natural das suas chances (*odds*) de se verificar. Esta razão é também designada rácio de verosimilhança (*odds ratio*). Correspondentemente, os coeficientes de regressão β_i não descrevem a variação da variável dependente por unidade de variação de cada independente (tal como ocorre na regressão linear), mas sim a variação no logaritmo das chances de ocorrência da instância considerada quando cada variável

independente varia uma unidade. Como os valores de β_i são difíceis de interpretar, é habitual interpretar a exponencial destes valores $Exp(\beta_i)$, que representa a razão entre os rácios das chances quando X_i aumenta uma unidade, e quando X_i se mantém igual (Maroco, 2007:692). Em função da sua adequação a variáveis categóricas, a regressão logística difere da regressão linear quanto ao método de estimação dos coeficientes de regressão. Por oposição à minimização dos quadrados das diferenças entre valores previstos e observados (vd. III.3.3.1), é adoptado o método da máxima verosimilhança, maximizando a probabilidade de obter as instâncias da variável dependente observadas nas unidades de análise a partir das quais se constrói o modelo⁶¹.

Finalmente, o modelo de regressão logística não pressupõe normalidade das variáveis independentes, exigindo apenas que não sejam multicolineares (à semelhança do modelo de regressão linear) (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004: 312).

No contexto do ravinamento, Meyer e Martínez-Casasnovas (1999) utilizaram regressão logística para prever a localização de ravinas efémeras em vinhas do NE de Espanha com recurso a variáveis topográficas (declive e perfil transversal das vertentes⁶²), classificando correctamente 84,6% das áreas de teste usadas para validação. Mais tarde, Martínez-Casasnovas *et al.* (2004) recorreram à mesma técnica para explicar a evolução lateral de grandes ravinas na mesma área de estudo. Usando como referência a evolução verificada ao longo de dois períodos de 20 e de 7 anos, classificaram correctamente 87% das áreas de validação utilizadas, embora não tenham conseguido prever de forma satisfatória os locais onde a expansão das formas efectivamente se verificou (i.e. erro de omissão > 50%). Numa outra aplicação, Hyde *et al.* (2007) usaram regressão logística para discriminar bacias sujeitas ao rejuvenescimento de ravinas em associação a episódios de precipitação intensa pós-fogo usando um novo índice de severidade dos estragos causados por incêndios. O modelo obtido, aplicado a uma área no W do estado norte-americano do Montana, permitiu prever correctamente o rejuvenescimento em 78,8% dos casos e a sua ausência em 81% dos casos. Outras aplicações publicadas incluíram, por exemplo, a definição da susceptibilidade à ocorrência de incêndios de grande magnitude (Bergonse e Bidarra, 2010), a modelação da distribuição espacial do grau de adequação a diferentes classes de vegetação (Alvarez-Arbesú e Felicísimo, 2002), ou a modelação da ocorrência de deslizamentos (Chang *et al.*, 2007)

⁶¹ A formulação da aplicação do método da máxima verosimilhança é dada em Maroco, 2007: 693.

⁶² Os autores usaram variáveis independentes dicotómicas, descrevendo a existência/inexistência de um perfil transversal rectilíneo, e a existência/inexistência de um perfil transversal convexo. Valores negativos em ambos foram interpretados como a existência de um perfil côncavo.

Aplicação e resultados

Foram geradas de forma aleatória no interior das duas bacias em estudo duas amostras de 400 pontos, sendo uma definida dentro dos 90 polígonos correspondentes aos complexos de ravinas, e outra no seu exterior, em áreas não entalhadas⁶³. Assegurou-se que todos os polígonos contiveram pontos no interior, sendo estes retirados manualmente das formas com maior concentração quando necessário. No caso dos pontos gerados no exterior dos polígonos, foram movidos manualmente aqueles situados em fundos aplanados de vale e áreas de planalto (onde, como já foi referido, não há qualquer incidência de ravinamento), bem como sobre áreas entalhadas.

Os 800 pontos foram depois sobrepostos a sete dos temas anteriormente gerados, cujas variáveis foram consideradas como podendo ter exercido efeito sobre o surgimento das formas. Estes foram o declive (*Dec*), a orientação das vertentes (*Orient*), as curvaturas planar e de perfil (*C_pl* e *C_per*), o Índice de Potência do Escoamento (*IPE*), e o Índice Topográfico de Encharcamento (*ITE*)⁶⁴. Adoptou-se também a distância às desembocaduras das bacias (*D_des*), de forma a aferir até que ponto as variações passadas no nível de base, embora não tendo mostrado controlo sobre o desenvolvimento das formas (vd. 3.3.1 e Tabela 57), o poderiam fazer com a sua localização.

Embora os temas cartográficos utilizados sejam o resultado da metodologia adoptada com relação à regressão linear múltipla, é de notar que a sua utilização é aqui marcada por uma importante diferença: anteriormente, cada unidade de análise correspondeu a um dos 90 polígonos, caracterizado através de indicadores (e.g. declive máximo, declive médio). Na metodologia que agora se descreve, cada unidade de análise foi um de 800 pontos, sendo adoptado o valor individual da célula de cada um dos temas das variáveis a que este se sobrepõe em ambiente SIG.

A sobreposição permitiu construir uma tabela com os valores associados a cada ponto⁶⁵. Esta serviu depois de base às análises que a seguir se descrevem.

Em primeiro lugar, procurou-se definir em que medida cada uma das variáveis permite diferenciar os pontos definidos sobre complexos de ravinas e sobre áreas não entalhadas. Desde que seja coerente com o enquadramento teórico do fenómeno em estudo, a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias das duas distribuições é um

⁶³ Foi utilizada a função *Generate Random Points* do ArcGIS 9.1.

⁶⁴ Com respeito à justificação teórica do uso destas variáveis, vd. III.2.4 (distância à desembocadura); III.2.5 (declive e curvaturas); III.2.6 (área de drenagem) e III.2.7 (orientação das vertentes). Os índices topográficos de Encharcamento e de Potência do Escoamento (*ITE*, *IPE*) foram já enquadrados no Capítulo II (II.2.1).

⁶⁵ A tabela foi construída usando a ferramenta *Sample* do ArcGIS 9.1.

importante indicador de que a variável pode ter exercido um efeito relevante sobre a presença das formas, justificando a sua integração no modelo de regressão logística (e.g. Meyer e Martínez-Casasnovas, 1999).

Em ordem a definir o tipo de teste de diferenciação estatística a aplicar (i.e. paramétrico ou não paramétrico), foi primeiro necessário verificar, para cada variável independente quantitativa, os dois pressupostos associados aos testes paramétricos. À semelhança do que foi já realizado anteriormente (vd. II.3.2.2.3), foram aplicados o teste de Kolmogorov-Smirnov à normalidade e o teste de Levene à homogeneidade das variâncias. Os resultados são apresentados na Tabela 64, e mostram que a hipótese de normalidade pode ser rejeitada com uma margem de erro inferior a 1% para quase todas as variáveis, com *Dec* constituindo a única exceção.

No caso do teste de Levene, os resultados permitiram rejeitar a hipótese de homogeneidade para a *D_des* e a *C_Per*.

Em função dos valores obtidos, todas as variáveis consideradas não normais foram comparadas usando o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, sendo *Dec* testado com recurso ao teste t-Student.

Os resultados são apresentados na Tabela 65 e mostram que *ITE* e *Dec* não apresentam valores médios significativamente diferentes em áreas entalhadas e não entalhadas.

Finalmente, e de forma a ilustrar graficamente as relações entre valores em áreas entalhadas e não entalhadas, foram construídos diagramas de extremos e quartis (*box-plots*) para cada variável considerada relevante, apresentados abaixo (Figura 78), e complementados pela Tabela 66.

Dada a sua natureza categórica, a orientação das vertentes foi comparada usando o teste do Qui-quadrado (χ^2) (Maroco, 2007:103). Os resultados mostraram que a hipótese (H_0) de igualdade entre as frequências de cada classe de orientação para locais entalhados e não entalhados pode ser rejeitada com uma margem de erro inferior a 0,001. Esta diferença muito significativa é claramente visível num gráfico de barras representando as percentagens de pontos associados às diferentes classes em áreas entalhadas e não entalhadas (Figura 79).

Tabela 64 - Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Levene à normalidade e à homogeneidade de variâncias, pressupostos dos testes paramétricos de diferenciação estatística. D - Estatística do teste de K-S; W- Estatística do teste de Levene. α - Probabilidades de erro associada à rejeição da hipótese nula nos dois testes. Foram considerados significativos valores $\leq 0,05$ (assinalados a negrito).

Variável	Formas erosivas	D	α	W	α
Dist. desembocadura	Não	0,070	0,000	116,479	0,000
	Sim	0,164	0,000		
ITE	Não	0,086	0,000	0,214	0,644
	Sim	0,058	0,003		
IPE	Não	0,443	0,000	1,172	0,279
	Sim	0,393	0,000		
Declive	Não	0,045	0,051	0,052	0,820
	Sim	0,043	0,072		
Curv.planar	Não	0,124	0,000	1,581	0,209
	Sim	0,107	0,000		
Curv.perfil	Não	0,134	0,000	10,655	0,001
	Sim	0,174	0,000		

Tabela 65 - Resultados dos testes de diferenciação estatística usados para aferir diferenças entre os valores amostrados para áreas não entalhadas e áreas correspondentes a formas erosivas. À exceção do declive, para o qual se adoptou o teste t-Student, todas as variáveis foram testadas com recurso ao teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov.

Variável	Estatística	α
<i>Declive^a</i>	1,647	0,100
Dist. desembocadura	6,364	0,000
ITE	1,273	0,078
IPE	1,838	0,002
Curv.planar	1,874	0,002
Curv.perfil	2,546	0,000

^a teste t-Student

A figura evidencia uma predominância das orientações a SE, E e W por parte das formas erosivas, em contraste com as vertentes não afectadas, e em acordo com o padrão já anteriormente observado na Figura 72.

As diferenças definidas pelos testes de hipótese estatística e representadas nos diagramas de extremos e quartis mostram que as formas tendem a ocupar áreas com C_{pl} e C_{per} menores do que a topografia envolvente e frequentemente com valores inferiores a 0, indicando uma topografia relativamente côncava em termos planares e convexa em termos de perfil.

É de salientar que, embora a diferença nas médias em termos de IPE se tenha verificado estatisticamente significativa, a Figura 78 e a Tabela 66 não mostram um contraste claro entre

os valores nas formas e na topografia não entalhada, com uma média mais elevada para os valores associados a esta última e os percentis 50, 75 e 90 mais elevados para os pontos nas formas.

Os resultados também mostram uma diferença muito clara entre os valores de D_{des} para as áreas entalhadas e não entalhadas (Figura 78 (a)). Assumindo igualdade dos restantes factores (i.e. ausência de acção antrópica nas áreas actualmente entalhadas), esta diferença estaria de acordo com a hipótese já colocada de um controlo por parte do nível de base sobre a origem dos sistemas de ravinas em estudo. Não é, porém, conclusiva, dado que o abaixamento do nível de base teve também como consequência necessária o alargamento dos vales das duas ribeiras, e portanto uma maior exposição dos arenitos e argilas em que as formas presentemente se situam. Neste sentido, a dinâmica do nível de base pode ter sido o factor crítico que levou ao surgimento das formas em estudo, mas pode igualmente ter tido um papel menos directo, promovendo um enquadramento morfogenético (i.e. vertentes mais extensas e erodíveis) que só mais tarde poderá ter tido expressão efectiva.

Ainda assim, as análises realizadas deixam clara a relação entre a proximidade à desembocadura e a localização das formas, pelo que, seja exprimindo um controlo mais ou menos directo por parte do Tejo, D_{des} foi considerada relevante em análises subsequentes.

Finalmente, foi analisada do ponto de vista teórico a coerência do efeito da orientação das vertentes. De acordo com as considerações já apresentadas em III.2.7, este factor exerce o seu efeito através da radiação solar recebida, num contraste máximo Norte-Sul. Neste contexto, não é possível estabelecer uma relação causal entre a presença de formas erosivas e a sua orientação predominante a E, W e SE, sugerindo que este padrão reflecte apenas o traçado da rede de drenagem em cujas cabeceiras as formas ocorrem⁶⁶. A análise da distribuição das formas com relação à topografia confirma esta noção, conforme os exemplos apresentados na Figura 80.

⁶⁶ A rib^a de Ulme possui uma orientação geral E-W, e a rib^a do Vale do Casal Velho orienta-se geralmente SE-NW.

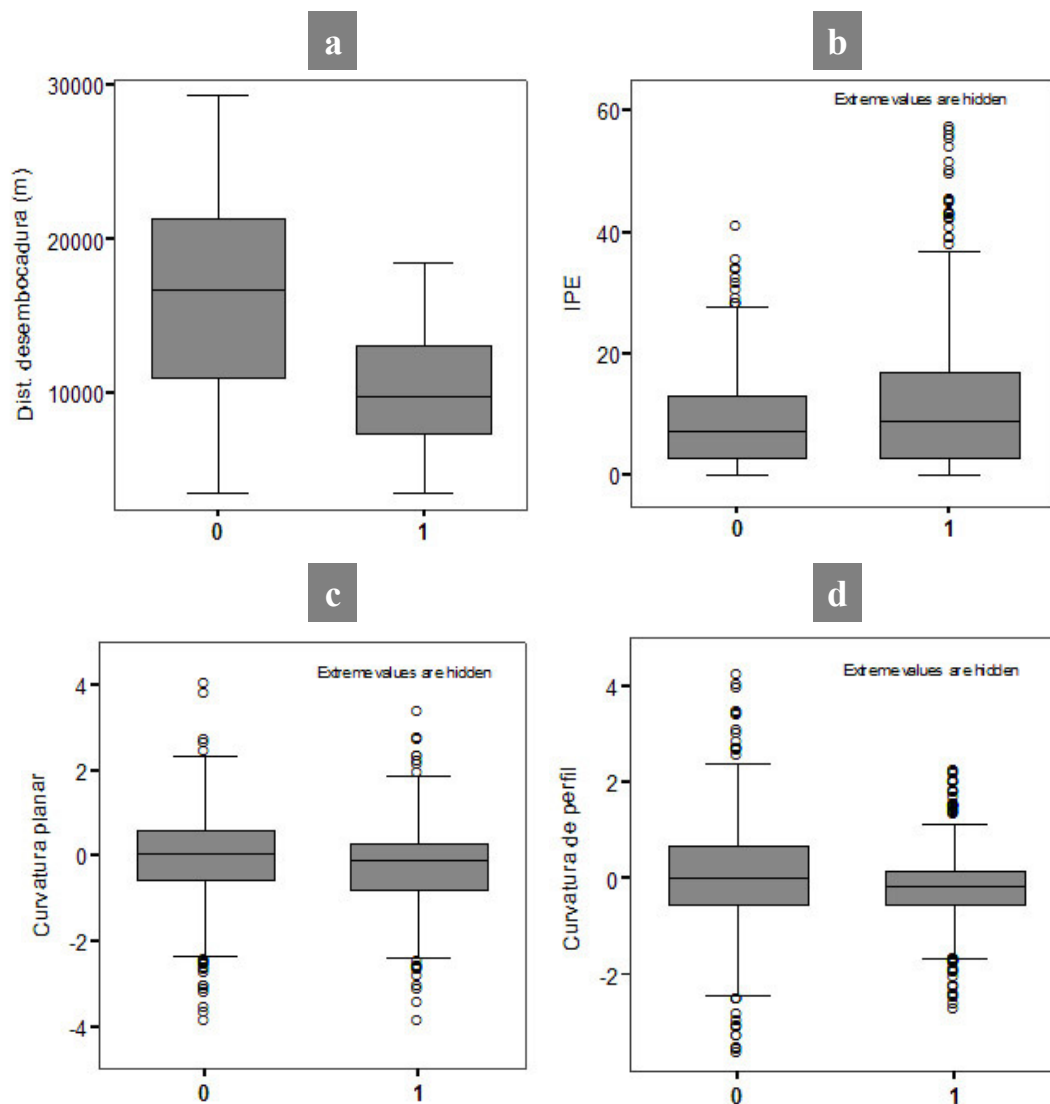


Figura 78 - Diagramas de extremos e quartis (*box-plots*) para os valores das variáveis consideradas relevantes em áreas não entalhadas (0) e entalhadas (1). As caixas representam a mediana, o 1º e o 3º quartil. Os traços contínuos horizontais separados representam os valores máximos e mínimos não considerados *outliers*, e os círculos os *outliers* (valores distando entre 1,5 e 3 vezes a amplitude interquartílica (AIQ) face ao 1º e ao 3º Quartis). Para facilitar a visualização, os valores extremos (com diferenças superiores a mais de 3 vezes a AIQ face ao 1º e ao 3º Quartis) não foram mostrados em (b), (c) e (d), não ocorrendo em (a).

Tabela 66 - Valores da média e do percentil 90 para as amostras de cada uma das variáveis consideradas relevantes. Os valores destinam-se a complementar a Figura 78, onde os percentis 25 (1º quartil), 50 (mediana) e 75 (3º quartil) já são apresentados graficamente.

	Dist. des (m)		IPE		C_pl		C_per	
	0	1	0	1	0	1	0	1
Média	13098	7212	26,36	21,95	-0,12	-0,27	0,11	-0,12
PC90	22456	14050	23,09	38,10	1,21	0,93	1,69	1,15

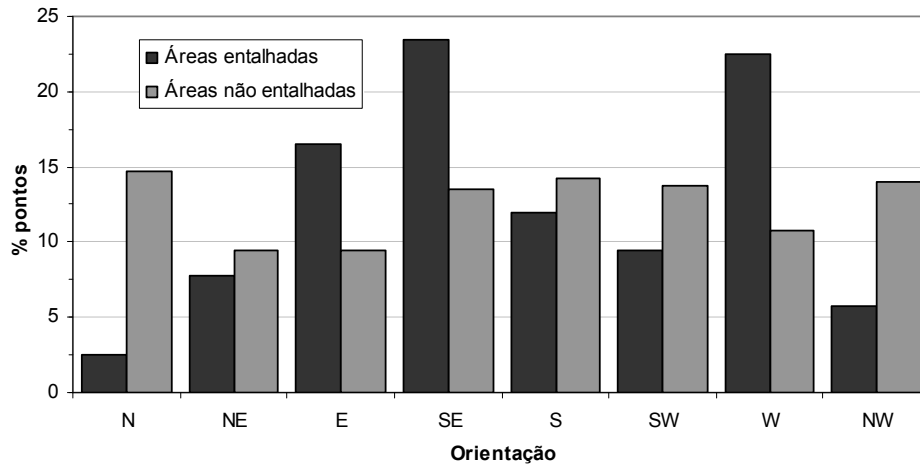


Figura 79 - Percentagens de pontos associados às diferentes classes de orientação das vertentes, em áreas entalhadas e não entalhadas.

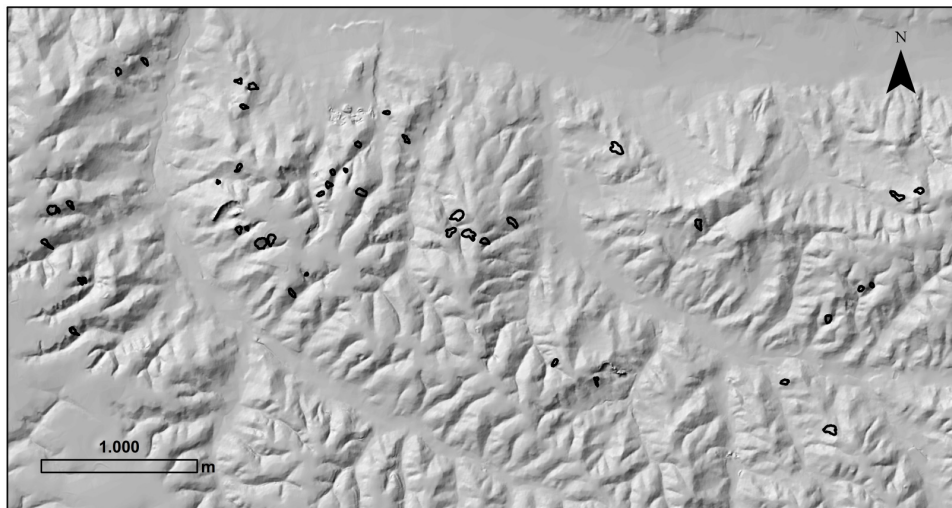


Figura 80 - A relação entre a orientação e a rede de drenagem. A figura abrange 44 complexos de ravinas (delimitados a negro) na margem sul da rib^a de Ulme (cujo fundo de vale define o seu limite superior). A relação entre a orientação predominante das formas (SE, E e W) e a configuração da própria rede de drenagem é observável.

Uma vez definidas as variáveis a integrar no modelo de regressão logística, foi construída uma tabela de correlação em ordem a analisar as relações mútuas e evitar a ocorrência de multicolinearidade, problema comum à regressão logística e à regressão linear múltipla (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004: 312). Os resultados são apresentados na Tabela 67, e mostram que as correlações significativas encontradas são muito baixas. De forma a procurar validar quantitativamente esta noção, calculou-se o *Variance Inflating Factor* (VIF, já descrito em III.3.3.1), construindo modelos de regressão linear múltipla usando cada uma das cinco variáveis independentes como dependente face às restantes quatro. Os valores obtidos

variaram entre 1,087 (*D_des*) e 1,197 (*C_pl*), muito abaixo dos valores de referência habituais em diagnósticos de multicolinearidade ($VIF > 5$, cf. Maroco, 2007: 603).

Tabela 67 - Correlações lineares e respectivas margens de erro entre as variáveis consideradas relevantes como factores de controlo da presença de formas erosivas.

	D_des	IPE	Cpl	Cper
D_des	1,000	-0,010	0,087	-0,015
	<i>p</i> =----	<i>p</i> =0,778	<i>p</i> = 0,014	<i>p</i> =0,677
IPE		1,000	-0,293	0,232
		<i>p</i> =----	<i>p</i> = 0,000	<i>p</i> = 0,000
Cpl			1,000	-0,331
			<i>p</i> =----	<i>p</i> = 0,000
Cper				1,000
				<i>p</i> =----

Foi por fim construído o modelo de regressão logística usando o SPSS 16.0 (SPSS, Inc.)⁶⁷. Do conjunto de 800 pontos, foi extraído um sub-conjunto de 267 (correspondente a um terço do total, ou 266,6). Este sub-conjunto foi guardado para validação independente do modelo, para cuja construção foram usados os restantes 533 pontos. Após a obtenção dos resultados, foram analisados os resultados do teste de Wald, calculados automaticamente pelo SPSS e destinados a testar a hipótese nula de que cada um dos coeficientes de regressão é igual a 0, ou seja, não tem qualquer contributo para o modelo (Maroco, 2007: 700). Verificou-se que, de todas as variáveis, apenas *D_des* se mostrou significativa para uma margem de erro de 5% (obteve $\alpha < 0,001$), sendo todas as restantes eliminadas (*IPE* com $\alpha = 0,564$; *C_pl* com 0,901 e *C_per* com 0,080). Foi novamente corrido o processo de modelação com a única variável significativa, sendo os resultados apresentados na Tabela 68 juntamente com os valores associados aos testes de significância e qualidade do modelo, a seguir descritos.

Tabela 68 - Resultados da regressão logística utilizando a única variável independente considerada significativa segundo o teste de Wald. β - Coeficientes de regressão logística; *Wald* - Estatística de Wald; α - margem de erro associada à rejeição da H_0 (i.e. $\beta=0$).

	β	Exp(β)	Wald	α
Intercepto	2,681410838	14,60568502	98,61	0,000
<i>D_des</i>	-0,000200527	0,999799493	103,57	0,000

Teste do Rácio de Verossimilhanças: $\alpha = 0,000$
 Teste de ajustamento de Hosmer e Lemeshow: $\alpha = 0,000$
 pseudo- R^2 Nagelkerke: 0,322

⁶⁷ Utilizou-se o método *Enter*, definido por defeito no *software*, e segundo o qual todas as variáveis são inseridas em simultâneo.

O teste do Rácio de Verossimilhanças⁶⁸ pretende testar a significância do modelo ajustado com base na razão entre a verossimilhança de um modelo com todas as variáveis face à de outro só com o intercepto. No presente caso, o valor de α é extremamente baixo (0,000), mostrando que o modelo é estatisticamente muito significativo ou, por outras palavras, que a variável independente influencia o *logit* (Maroco, 2007: 697), em concordância com a significação obtida no teste de Wald⁶⁹. Por oposição, o resultado do teste de ajustamento de Hosmer e Lemeshow permite rejeitar a H_0 , com uma margem de erro extremamente baixa, indicando um fraco ajustamento entre o modelo e os dados que este pretende reproduzir⁷⁰.

Finalmente, o pseudo- R^2 de Nagelkerke, variando entre 0 e 1 e calculado pelo SPSS como uma aproximação à proporção da variância da variável dependente explicada pelo modelo⁷¹ (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004: 315; Maroco, 2007: 701) produziu um valor de apenas 0,322.

De forma a validar independentemente os resultados do modelo e assim quantificar a sua capacidade discriminante, a equação associada foi operacionalizada para os 267 pontos anteriormente guardados para validação com recurso aos coeficientes apresentados na Tabela 68. A formulação do modelo construído é, assim:

$$p(rv) = \frac{e^{(2,681410838-0,000200527.D_des)}}{1 + e^{(2,681410838-0,000200527.D_des)}}$$

em que $p(rv)$ é a probabilidade de cada unidade de análise (ponto) se situar numa área ravinada, variando entre 0 e 1. A equação foi implementada no Microsoft Excel, sendo

⁶⁸ Denominado *omnibus test of model coefficients* no *output* do SPSS.

⁶⁹ Apesar do reduzidíssimo valor do coeficiente e do seu exponencial, é importante levar em conta que a variável está expressa em metros. Sendo $\exp(\beta)$ o rácio entre as chances de ocorrência do fenómeno (*odds*) quando a variável aumenta uma unidade e quando se mantém igual (Maroco, 2007: 692), este valor indica que a variação de 1 m na distância à desembocadura tem um efeito (negativo) muito reduzido sobre a ocorrência de formas erosivas. O mesmo não ocorrerá, porém, se a variação for da ordem dos milhares, como é o caso entre os pontos amostrados (valor mínimo de 3579 e máximo de 29320 m).

⁷⁰ O teste consiste na aplicação do teste do Qui-quadrado a uma tabela de contingência 2.g, em que as duas instâncias da variável dependente são cruzadas com g grupos definidos pelos decis das probabilidades de ocorrência (estimadas pelo modelo para cada unidade de análise) (Maroco, 2007: 699). O teste é considerado significativo quando as distribuições das unidades de análise pelas classes são muito semelhantes às esperadas em função das probabilidades associadas a cada classe (i.e. quando as "presenças" se concentram nas classes de probabilidades altas e as "ausências" nas de probabilidades baixas). Caso haja diferenças significativas, o modelo permite rejeitar a H_0 (de que o modelo se ajusta aos dados) não se podendo portanto considerar adequado.

⁷¹ O indicador de Nagelkerke é uma adaptação do Pseudo- R^2 de Cox & Snell (que apresenta a desvantagem de nunca atingir 1, sendo de interpretação mais difícil). A variância de variáveis dicotómicas depende da distribuição das frequências dos valores, sendo máxima para uma frequência igual (probabilidade de 0,5 de ocorrência de cada uma das classes) e decrescendo com o aumento da frequência de qualquer uma das duas classes (Maroco, 2007: 701). Neste sentido, não é possível comparar valores de R^2 obtidos para modelos diferentes em regressão logística, a menos que as distribuições dos valores das variáveis dependentes sejam iguais. Os pseudo- R^2 pretendem assim ser aproximações ao R^2 , mas assentam na diferença entre as verossimilhanças de um modelo ajustado com todas as variáveis seleccionadas e um modelo nulo (i.e. só com o intercepto).

definido o limiar de 0,5 para definir uma área como estando ou não afectada por ravinas. Os resultados da validação utilizando os 267 pontos são apresentados na Tabela 69.

A análise da tabela permite constatar que o modelo prevê razoavelmente a presença e a ausência de complexos de ravinas, tendo classificado correctamente 68,9% das unidades de análise. Percentagens muito próximas foram obtidas para a sensibilidade e a especificidade, ou seja, a capacidade do modelo para prever, respectivamente, valores positivos na presença do fenómeno, e valores negativos na sua ausência (e.g. Alvarez-Arbesú e Felicísimo, 2002: 221; Maroco, 2007: 709). É de salientar que estes indicadores são alternativas aos conceitos de erros de comissão e omissão adoptados por Meyer e Martínez-Casasnovas (1999) e Martínez-Casasnovas *et al.* (2004)⁷².

Tabela 69 - Resultados da validação do modelo de regressão logística com recurso ao conjunto independente de 267 pontos.

Valores observados	Valores previstos		Total
	P1 (p=>0,5)	P0 (p<0,5)	
O1	91	36	127
O0	47	93	140
	138	129	267
Sensibilidade (P1O1/Total O1*100) (%)			71,7
Especificidade (P0O0/Total O0*100) (%)			66,4
Percentagem de valores correctamente previstos			68,9
Área sob a curva ROC			0,76

Foi também calculada a área sobre a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Este indicador pretende fornecer uma caracterização gráfica da capacidade de um classificador para discriminar o fenómeno de interesse na sua presença e de minimizar as classificações erradas na sua ausência (i.e. erros de comissão). É obtido criando um gráfico de dispersão em que para todos os possíveis limiares de probabilidade adoptados para discriminar presença vs. ausência, são cruzadas a sensibilidade (eixo dos *yy*) e *1-especificidade*, ou seja, a proporção de falsos positivos (eixo dos *xx*) (Figura 81). A curva ROC tem a vantagem de comparar todos os possíveis limiares de um modelo, por oposição a um limiar arbitrariamente definido (e.g. 0,5; Hill e Lewicki, 2006: 707), e tem como referências valores de 1 (máxima capacidade para identificar o fenómeno na sua presença e de não o identificar erradamente na

⁷² Os erros de omissão são constituídos pela percentagem de unidades de análise erradamente classificadas como não apresentando o fenómeno face à totalidade de unidades em que este ocorre (o valor complementar da sensibilidade). Por sua vez, os erros de comissão descrevem a percentagem de unidades de análise erradamente classificadas como tendo o fenómeno face ao total de unidades de análise onde este não ocorre (o valor complementar da especificidade).

sua ausência) e 0,5 (modelo aleatório, sem qualquer capacidade de classificação). No presente caso, o valor obtido de 0,76 mostra claramente que o modelo possui poder discriminante. De acordo com os valores de referência propostos por Hosmer e Lemeshow (2000, citados em Maroco, 2007: 710), este valor permite classificar o modelo como estando próximo do limite entre uma discriminação "aceitável" e "boa" (0,80).

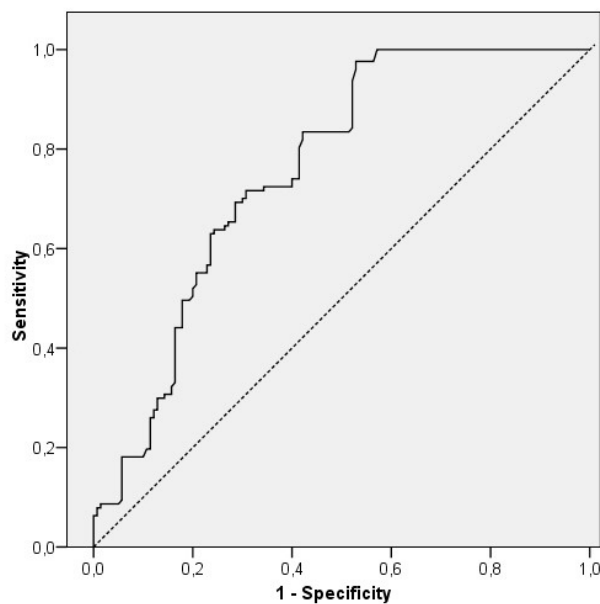


Figura 81 - Curva ROC (linha a cheio) construída com base na validação independente do modelo de regressão logística. Foi obtida usando o SPSS 16.0.

Por fim, foi criado um gráfico de barras representando a distribuição dos valores observados para os 267 pontos (i.e. 0 ou 1) pelas probabilidades previstas (Figura 82). Na presença de um modelo perfeito, o padrão expectável seria uma concentração dos pontos das classes opostas nos respectivos extremos do gráfico, e uma reduzida presença de pontos no meio. Na presença de um modelo sem qualquer capacidade discriminante, será de esperar uma distribuição mais ou menos homogénea de pontos nas duas classes ao longo de todas as classes de probabilidade. No presente caso, a análise dos resultados permite observar que, conforme já foi referido, o modelo permite diferenciar razoavelmente as duas classes opostas. Ao mesmo tempo, é evidente que o modelo identifica melhor áreas entalhadas do que não entalhadas, já que há claramente uma maior concentração dos pontos com valor 1 nas classes de probabilidade elevada do que o oposto. Neste aspecto, é de notar a ausência de pontos de valor 1 nas classes de probabilidade mais baixa, em contraste com a frequência de pontos de

valor 0 nas classes de probabilidade mais elevada, iniciando um modelo com maior sensibilidade do que especificidade, em acordo com os valores já mostrados na Tabela 69⁷³.

O mesmo padrão caracteriza a totalidade dos 800 pontos conhecidos, tal como foi possível observar ajustando um modelo de regressão logística com a mesma variável independente ao conjunto e construindo um gráfico de barras semelhante ao anterior (Figura 83).

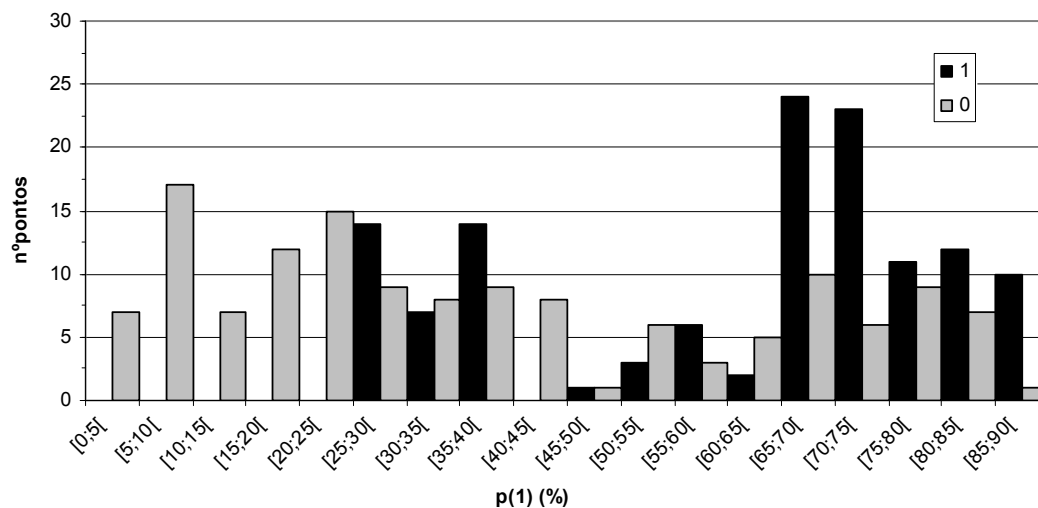


Figura 82 - Distribuição dos pontos sobre áreas entalhadas (1) e não entalhadas (0) pelos valores de probabilidade calculados com relação ao conjunto de 267 pontos para validação. As probabilidades foram organizadas em dez classes.

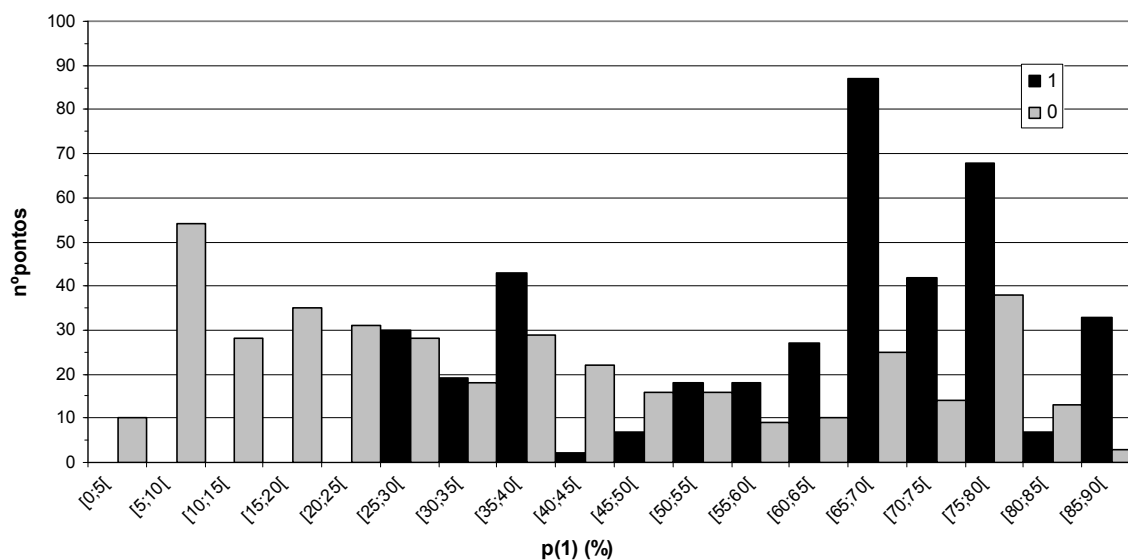


Figura 83 - Relação entre presença/ausência de ravinamento e a sua probabilidade de ocorrência de acordo com um modelo ajustado aos 800 pontos conhecidos. Notar o paralelismo no padrão de distribuição dos erros pelas diferentes classes de probabilidade face à figura anterior.

⁷³ É aqui importante salientar que, apesar da capacidade discriminante em termos gerais, a quantidade de pontos classificados como ravinados não aumenta claramente com o aumento da probabilidade. Este desajustamento está na origem do fraco resultado obtido no teste de Hosmer e Lemeshow (Tabela 68), já descrito atrás.

A metodologia aplicada até este ponto permitiu demonstrar que existe uma relação significativa, directa ou indirecta, entre a presença de complexos de ravinas e a proximidade à desembocadura das respectivas bacias. Os resultados também deixaram claro que, de forma oposta, as propriedades topográficas não permitem discriminar as áreas não entalhadas daquelas que antecederam as actuais formas erosivas.

Considerando especificamente o papel da topografia, os resultados da modelação afiguram-se algo contraditórios quando contrastados com as diferenças significativas anteriormente encontradas nos testes de diferenciação estatística. Conjuntamente, estes resultados sugerem duas possibilidades: (1) a topografia que antecedeu a generalidade da superfície actualmente ocupada pelas formas erosivas é efectivamente diferente da envolvente (conforme os testes, vd. Tabela 65), mas essa diferença não é suficiente para discriminar áreas entalhadas de não entalhadas, o que implica a existência de outro (ou outros) factor não considerado até este ponto; (2) apenas uma parte da topografia presentemente ocupada pelas formas é significativamente diferente da envolvente do ponto de vista da discriminação de áreas entalhadas, e a inclusão de toda esta superfície em conjunto condicionou os resultados da modelação.

No contexto desta segunda hipótese, e assumindo uma origem na actual área da desembocadura (em concordância com a anteriormente demonstrada relação entre dimensões e área de drenagem medida na desembocadura; vd. III.3.3.1) será plausível que as eventuais propriedades distintivas da topografia tenham tido expressão nesse local específico, promovendo a iniciação das formas. A sua expansão subsequente teria assim sido uma função da quantidade de escoamento disponível a partir de montante, i.e. área de drenagem. Em suma, e de acordo com esta hipótese, a topografia que antecedeu os sectores mais a montante das actuais formas não seria necessariamente diferente da envolvente, tendo o seu entalhe sido ditado pelo recuo das cabeceiras a partir dos locais das suas actuais desembocaduras.

De forma a testar esta hipótese, recorreu-se novamente à técnica da regressão logística, procurando agora diferenciar a topografia não erodida envolvente aos complexos de ravinas daquela que antecedeu especificamente os seus sectores de desembocadura. Para isso, começou-se por agregar num único tema as linhas delimitando os sectores de desembocadura definidas para o cálculo das áreas de drenagem (vd. III. 2.6.1), e utilizou-se a ferramenta *Create Random Points* para gerar aleatoriamente um conjunto de 400 pontos ao longo dos seus comprimentos, separados entre si por uma distância mínima de 2 m (a dimensão da célula). Uma análise subsequente do conjunto de pontos permitiu depois assegurar que todas

as formas tiveram pelo menos um ponto na desembocadura, sendo estes retirados das formas com maior quantidade quando necessário.

Finalmente, e à semelhança dos procedimentos adoptados com relação ao primeiro modelo de regressão logística construído, extraíram-se os valores de *IPE*, *ITE*, *Dec*, *C_{pl}*, *C_{per}*, e *D_{des}*. Para esta segunda regressão, extraíram-se adicionalmente os valores de área de drenagem, para cuja obtenção se recorreu ao tema de drenagem acumulada já anteriormente utilizado na regressão linear (vd. III.2.6.1), e obtido com base na actual topografia erodida⁷⁴. Esta variável não foi adoptada na anterior aplicação da regressão logística, já que as formas se estendem frequentemente até aos altos das vertentes, onde os valores de área de drenagem são muito reduzidos.

A tabela com todos os valores foi depois exportada para o SPSS 16.0, sendo realizada a sequência de análises já descrita para o primeiro modelo de regressão logística (testes de normalidade, testes de diferenciação estatística, análise de correlação, regressão).

De acordo com os resultados dos testes de normalidade (Tabela 70), as diferenças entre as variáveis foram testadas com recurso ao teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov. No caso específico do declive, em que os resultados permitiram rejeitar a hipótese de normalidade para os valores nas desembocaduras mas não para aqueles exteriores às formas, optou-se pela realização adicional do teste t-Student. Os resultados de ambos são coincidentes (Tabela 71), permitindo rejeitar a hipótese de que as médias de ambos os conjuntos são iguais. O mesmo resultado foi obtido para todas as restantes variáveis.

Os gráficos de extremos e quartis (Figura 84), complementados pelas medidas de posição na Tabela 72, mostram que as desembocaduras dos complexos de ravinas ocorrem mais próximo das desembocaduras das bacias (b), em locais com maior área de drenagem (g)⁷⁵, declives mais acentuados (Figura 84 (a)) e topografia relativamente côncava em termos planares (e).

⁷⁴ Embora em teoria fosse mais adequado determinar a acumulação do escoamento a partir da topografia reconstruída, a comparação das redes de drenagem obtidas com ambos os temas mostrou que esta produzia por vezes linhas de água desajustadas em alguns metros face ao local exacto de desembocadura das formas. Embora este desajustamento possa resultar simplesmente de uma reconstrução topográfica inadequada, considerou-se que os erros relativamente baixos obtidos durante o processo de interpolação e validação da superfície reconstruída (Erro absoluto médio de 75,2 cm, cf. Tabela 50) permitem atribuir a sua causa a outros dois factores: (1) a escala da informação de base (1:10000) e a resolução do modelo gerado (2 m), grosseiras demais para representar em detalhe concavidades presentes na topografia original e determinantes da drenagem; (2) o facto de a reconstrução ter incidido apenas sobre as extensões abrangidas pelas formas. Imediatamente junto a estas, todas as concavidades e canais foram mantidos, influenciando o escoamento modelado para a superfície antecedente.

⁷⁵ Com respeito à área de drenagem, é de notar que o gráfico mostra uma mediana e um percentil 25 inferiores aos obtidos em áreas não entalhadas. Este resultado particular não é surpreendente, dado que as formas tendem a ocupar linhas de água de ordem 1 nos sectores superiores das vertentes, enquanto os pontos amostrados fora delas se distribuem desde o alto até à base das vertentes, onde as áreas de drenagem tendem a ser superiores. Ainda assim, a análise dos valores na Tabela 72 mostra que a média dos pontos nas desembocaduras é bastante superior, o mesmo acontecendo com os percentis 75 e 90.

Ao contrário dos resultados obtidos considerando a totalidade das formas (Figura 78; Tabela 66), a curvatura de perfil apresenta-se agora marcadamente mais elevada do que a envolvente, indicando uma maior concavidade (Figura 84 (f); Tabela 72) e sugerindo desaceleração do escoamento, por oposição à aceleração que estaria associada a um perfil convexo.

Ao mesmo tempo, as áreas de desembocadura apresentam valores em ambos os índices topográficos mais elevados do que a topografia não erodida envolvente. No caso do Índice de Potência do Escoamento, esta diferença já tinha sido encontrada usando a totalidade das áreas (Figura 78 (b); Tabela 66), mas é agora mais clara (Figura 84 (d)). O Índice Topográfico de Encharcamento (Figura 84 (c)) não se tinha antes mostrado relevante, não tendo sido possível diferenciar estatisticamente os valores nas formas e fora delas (Tabela 65).

Estes resultados sugerem para as áreas de desembocadura dos complexos de ravinas condições mais adequadas à ocorrência de escoamento erosivo e a concentrações elevadas de água no rególito do que as que caracterizam a topografia envolvente, reforçando a hipótese já avançada de que o efeito da topografia terá tido a sua expressão nos sectores de iniciação das formas e não nas áreas a montante, posteriormente entalhadas.

Tabela 70 - Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e de Levene à normalidade e à homogeneidade de variâncias para as variáveis em análise. *D* - Estatística do teste de K-S; *W* - Estatística do teste de Levene. α - Probabilidades de erro associada à rejeição da hipótese nula nos dois testes. Foram considerados significativos valores $\leq 0,05$ (a negrito).

Variável	Formas erosivas	D	α	W	α
Dist. desembocadura	Não	0,076	0,000	224,484	0,000
	Sim	0,204	0,000		
ITE	Não	0,086	0,000	1,298	0,255
	Sim	0,117	0,000		
IPE	Não	0,443	0,000	12,656	0,000
	Sim	0,404	0,000		
Declive	Não	0,045	0,053	2,659	0,103
	Sim	0,049	0,024		
curv_pl	Não	0,121	0,000	39,284	0,000
	Sim	0,081	0,000		
curv_per	Não	0,134	0,000	40,671	0,000
	Sim	0,115	0,000		
a_dren	Não	0,479	0,000	4,478	0,035
	Sim	0,429	0,000		

Finalmente, foram analisadas as correlações lineares entre as variáveis (Tabela 73). Os resultados evidenciam numerosas relações significativas, embora muito fracas na maioria dos casos. O cálculo dos *Variance Inflating Factors* (VIF; vd. III.3.3.1) para todas as variáveis

permitiu afastar a hipótese de multicolinearidade, sendo o valor mais elevado obtido de 1,92. Assim, procedeu-se à modelação com as sete variáveis independentes iniciais.

Tabela 71- Resultados dos testes de diferenciação estatística usados para aferir diferenças entre os valores amostrados para áreas não entalhadas e para os sectores de desembocadura das actuais formas erosivas. À excepção do declive, para o qual se adoptou adicionalmente o teste t-Student (valores em itálico), todas as variáveis foram testadas com recurso ao teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov.

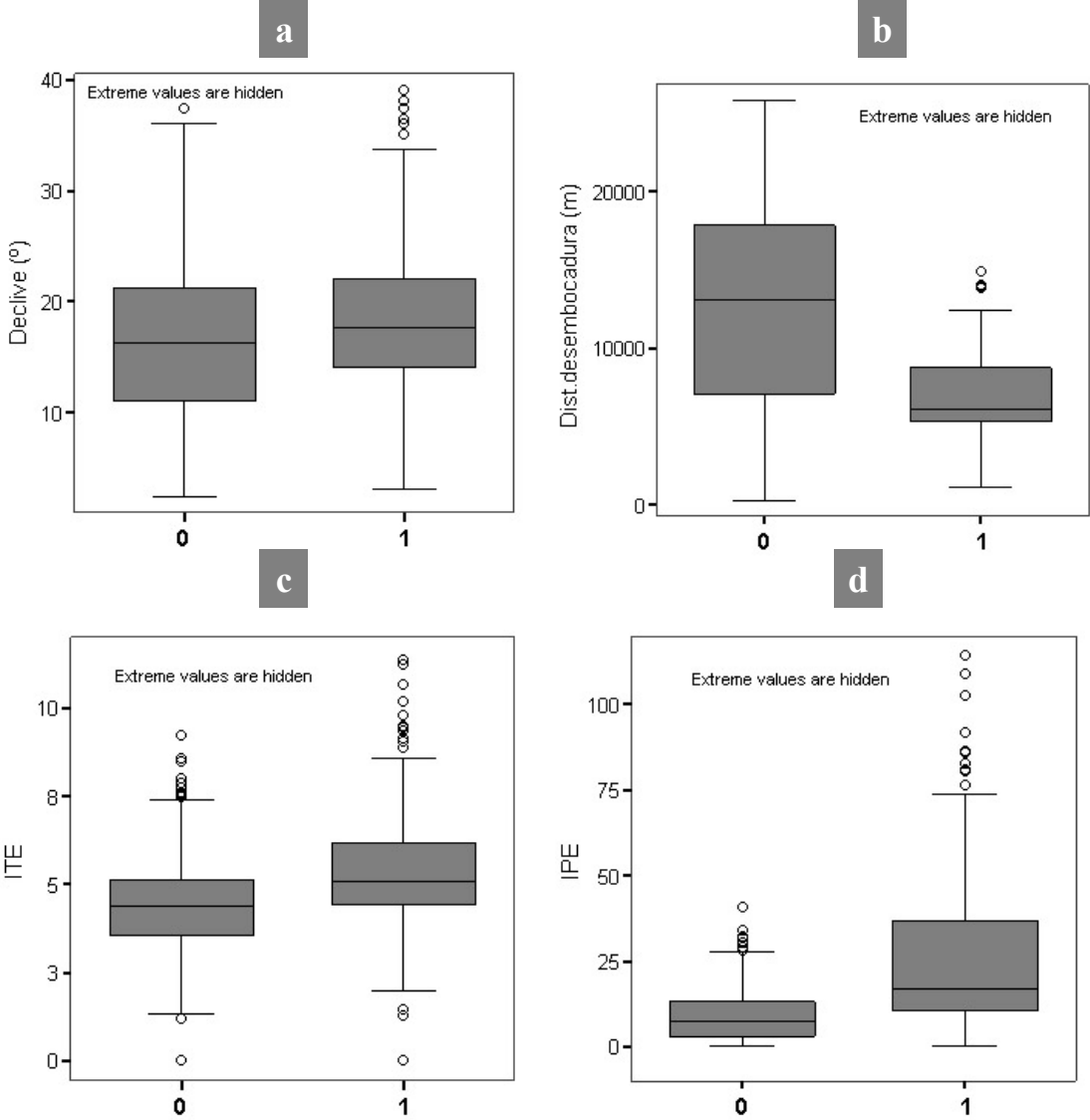
Variável	Estatística	α
Declive	2,369	0,000
	<i>3,397</i>	<i>0,001</i>
Dist. desembocadura	7,071	0,000
ITE	3,677	0,000
IPE	6,046	0,000
Curv.planar	4,384	0,000
Curv.perfil	4,808	0,000
Area drenagem	1,909	0,001

Após a selecção aleatória de 533 pontos para modelação (i.e. dois terços do total, destinando os restantes 267 pontos para validação), o algoritmo de regressão foi corrido. A análise do resultado permitiu, à semelhança do procedimento anteriormente seguido, eliminar as variáveis cujos coeficientes de regressão não se revelaram significativamente diferentes de 0 ($\alpha \leq 0,05$) no teste de Wald: *IPE* ($\alpha=0,147$), *C_pl* ($\alpha=0,869$) e *A_dren* ($\alpha=0,222$). Foi depois novamente corrido o processo de modelação com as quatro variáveis restantes. Os resultados, bem como os testes de significância e qualidade do modelo, são apresentados na Tabela 74.

O modelo é considerado estatisticamente muito significativo de acordo com os resultados do teste do Rácio de Verosimilhanças. Ao contrário da regressão anterior, também o Teste de Ajustamento de Hosmer & Lemeshow permite assumir o modelo como significativo (dado que $\alpha > 0,05$, não se podendo, para a margem de erro adoptada, rejeitar a hipótese nula de que o modelo se ajusta aos dados). Por último o pseudo- R^2 de Nagelkerke foi de 0,544, valor bastante superior aos 0,322 anteriormente obtidos.

Finalmente, retirou-se do modelo a distância à desembocadura a fim de aferir a importância da topografia das vertentes na iniciação dos sistemas de ravinas em estudo (Tabela 75). Como consequência, o valor de pseudo- R^2 desceu para 0,348, e não é possível já considerar que o modelo se ajuste aos dados segundo o Teste de Hosmer & Lemeshow.

Com base nos coeficientes obtidos, foram construídas as equações de regressão, depois implementadas no Microsoft Excel e utilizadas para classificar os 267 pontos de validação. Os resultados são sintetizados nas Tabelas 76 e 77.



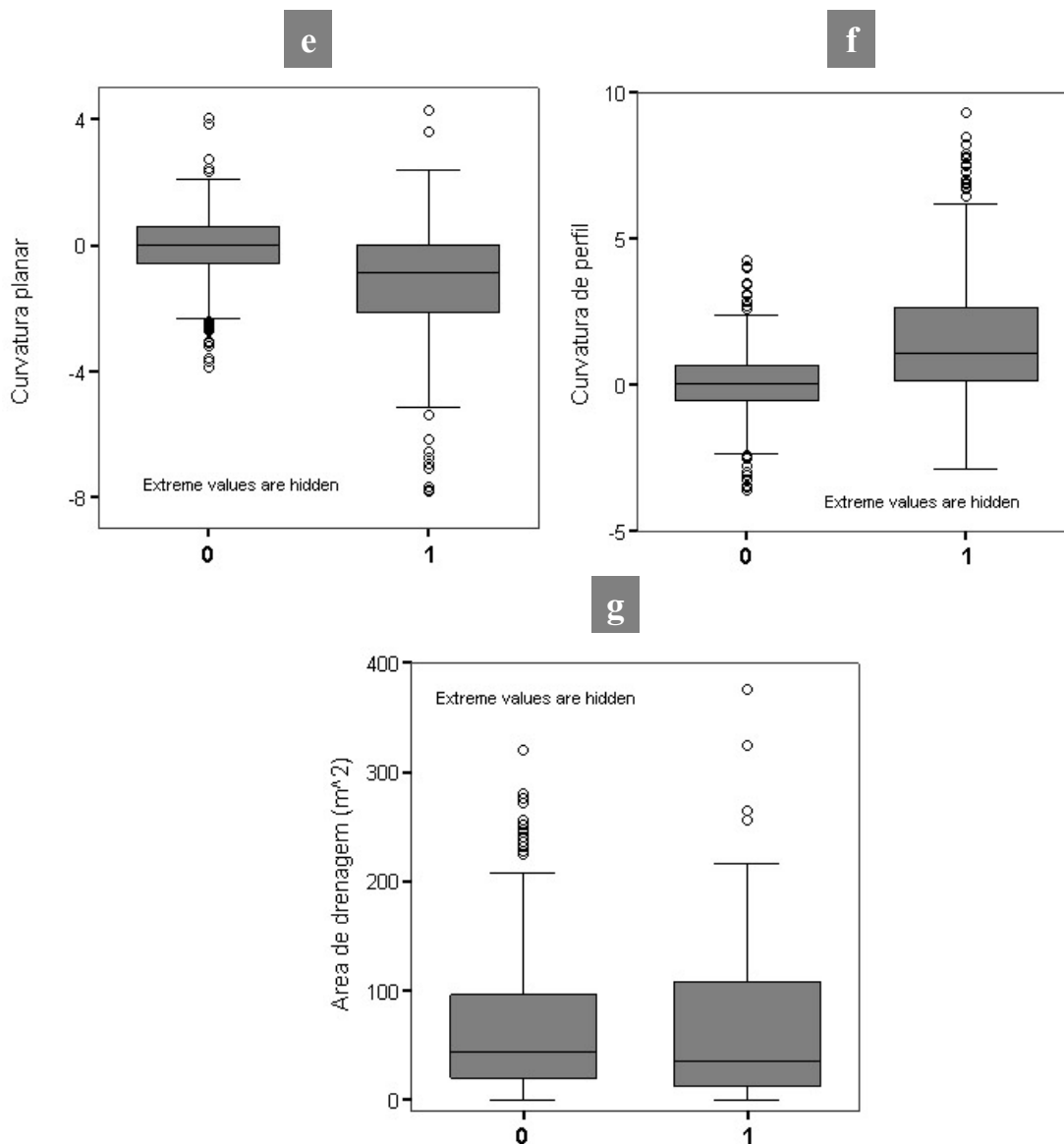


Figura 84 - Diagramas de extremos e quartis (*box-plots*) para os valores das variáveis consideradas relevantes, em áreas não entalhadas (0) e nas desembocaduras das formas (1). As caixas representam a mediana, o 1º e o 3º quartil. Os traços contínuos horizontais representam os valores máximos e mínimos não considerados *outliers*, e os círculos os *outliers* (valores distantes entre 1,5 e 3 vezes a amplitude interquartílica (AIQ) face ao 1º e ao 3º Quartis). Para facilitar a visualização, os valores extremos (com diferenças superiores a mais de 3 vezes a AIQ face ao 1º e ao 3º Quartis) não foram mostrados.

Tabela 72 - Valores da média e do percentil 90 para as amostras de cada uma das variáveis. Valores destinam-se a complementar a Figura 84, onde os percentis 25 (1ºquartil), 50 (mediana) e 75 (3º quartil) já são apresentados graficamente.

	Declive (°)		D des (m)		ITE		IPE	
	0	1	0	1	0	1	0	1
Média	16,50	18,15	15850	6990	4,38	5,32	26,36	73,93
PC90	25,80	27,32	22456	13913	5,97	7,02	23,09	92,99
	C_pl		C_per		A_dren (m²)			
	0	1	0	1	0	1		
Média	-0,12	-1,15	0,11	1,67	252	458		
PC90	1,21	0,76	1,69	4,69	248	614		

Tabela 73 - Coeficientes de correlação linear e respectivas margens de erro entre as variáveis analisadas.

	D_des	ITE	IPE	Dec	Cpl	Cper	A_dren
D_des	1	-0,102	-0,034	-0,025	0,201	-0,253	-0,040
p=----		p=0,004	p=0,330	p=0,472	p=0,000	p=0,000	p=0,264
ITE		1	0,525	-0,401	-0,416	0,136	0,026
p=----			p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,457
IPE			1	-0,171	-0,272	0,132	0,101
p=----				p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,004
Dec				1	-0,046	0,120	-0,058
p=----					p=0,196	p=0,001	p=0,102
Cpl					1	-0,398	-0,020
p=----						p=0,000	p=0,575
Cper						1	0,013
p=----							p=0,714
A_dren							1
p=----							p=----

Tabela 74 - Resultados da regressão logística utilizando as quatro variáveis consideradas significativas segundo o teste de Wald. β - Coeficientes de regressão logística; *Wald* - Estatística de Wald; α - margem de erro associada à rejeição da H_0 (i.e. $\beta=0$).

	β	Exp(b)	Wald	α
Intercepto	-2,647047105	0,070860147	14,40	0,000
dist_des	-0,000225464	0,999774562	79,84	0,000
ITE	0,57194414	1,771708153	39,12	0,000
declive	0,099550579	1,104674343	21,36	0,000
curv_per	0,504484988	1,656132373	35,94	0,000

Teste do Rácio de Verossimilhanças: $\alpha = 0,000$

Teste de ajustamento de Hosmer e Lemeshow: $\alpha = 0,06$

pseudo-R² Nagelkerke: 0,544

Tabela 75 - Resultados da regressão logística removendo a distância à desembocadura das variáveis consideradas significativas. β - Coeficientes de regressão logística; *Wald* - Estatística de Wald; α - margem de erro associada à rejeição da H_0 (i.e. $\beta=0$).

	β	Exp(β)	Wald	α
Intercepto	-4,169849047	0,015454593	43,74	0,000
ITE	0,492160406	1,635846497	38,49	0,000
declive	0,080723062	1,084070635	18,97	0,000
curv_per	0,573352718	1,774205502	54,74	0,000

Teste do Rácio de Verossimilhanças: $\alpha = 0,000$

Teste de ajustamento de Hosmer e Lemeshow: $\alpha = 0,005$

pseudo-R² Nagelkerke: 0,348

Tabela 76 - Validação do modelo de regressão logística incluindo a distância à desembocadura com recurso ao conjunto independente de 267 pontos.

Valores observados	Valores previstos		Total
	P1 (p=>0,5)	P0 (p<0,5)	
O1	106	24	130
O0	43	94	137
	149	118	267
Sensibilidade (P1O1/Total O1*100)			81,54
Especificidade (P0O0/Total O0*100)			68,61
Percentagem de valores corretamente previstos			74,91
Área sob a curva ROC			0,84

Tabela 77 - Validação do modelo de regressão logística excluindo a distância à desembocadura com recurso ao conjunto independente de 267 pontos.

Valores observados	Valores previstos		Total
	P1 (p=>0,5)	P0 (p<0,5)	
O1	98	32	130
O0	39	98	137
	137	130	267
Sensibilidade (P1O1/Total O1*100)			75,38
Especificidade (P0O0/Total O0*100)			71,53
Percentagem de valores corretamente previstos			73,41
Área sob a curva ROC			0,78

A conjugação dos resultados dos três modelos de regressão logística construídos permite concluir que a topografia que antecedeu os sectores de desembocadura das actuais formas, aqui assumidos como os seus locais de iniciação, é um factor bastante significativo na discriminação de áreas entalhadas. O mesmo não ocorre com a topografia na generalidade das áreas actualmente ocupadas pelos complexos de ravinas em estudo, reforçando a hipótese levantada anteriormente de que as diferenças na morfologia das vertentes só foram significativas no sector de iniciação das formas. Esta noção é apoiada pelos gráficos de extremos e quartis na Figura 84, mostrando diferenças entre as distribuições de valores em comparação muito mais claras do que anteriormente observado (Figura 78).

Em contraste com os resultados do primeiro modelo, a consideração das desembocaduras das formas nos outros dois modelos mostrou que, embora se mantenha significativa, D_{des} tem agora uma contribuição relativamente pequena para a percentagem de classificações correctas. Conforme mostra a comparação das percentagens de formas correctamente classificadas nas Tabelas 76 e 77, a sua integração com ITE , Dec e C_{per} aumentou a percentagem de valores correctamente previstos em apenas 1,5%.

É também de salientar que A_{des} , anteriormente definida através de regressão linear como exercendo um controlo fundamental sobre o desenvolvimento das formas (vd. III.3.3.1) não se

revelou significativa nos modelos centrados na desembocadura, o mesmo ocorrendo com *IPE* e *C_{pl}*.

O facto de o *IPE* não ter sido considerado significativo, ao contrário do *ITE*, sugere que o encharcamento terá tido um papel predominante na iniciação das formas, o que estaria de acordo com um papel relevante por parte dos movimentos de massa sobre o seu crescimento inicial.

Em síntese, a análise do melhor modelo obtido (e o único significativamente ajustado aos dados conforme o teste de Hosmer & Lemeshow) mostra que as desembocaduras das formas ocorrem relativamente próximo das desembocaduras das respectivas bacias, em topografia relativamente declivosa, de perfil relativamente côncavo, e com tendência para a concentração sub-superficial do escoamento. Este modelo permitiu classificar correctamente 81,5% dos pontos situados em áreas erodidas, e mostrou um valor de 0,84 da área sob a curva ROC, correspondendo segundo Hosmer e Lemeshow (2000; citado em Maroco, 2007: 710) a uma boa discriminação. A sua expressão gráfica é apresentada na forma de um gráfico de barras na Figura 85.

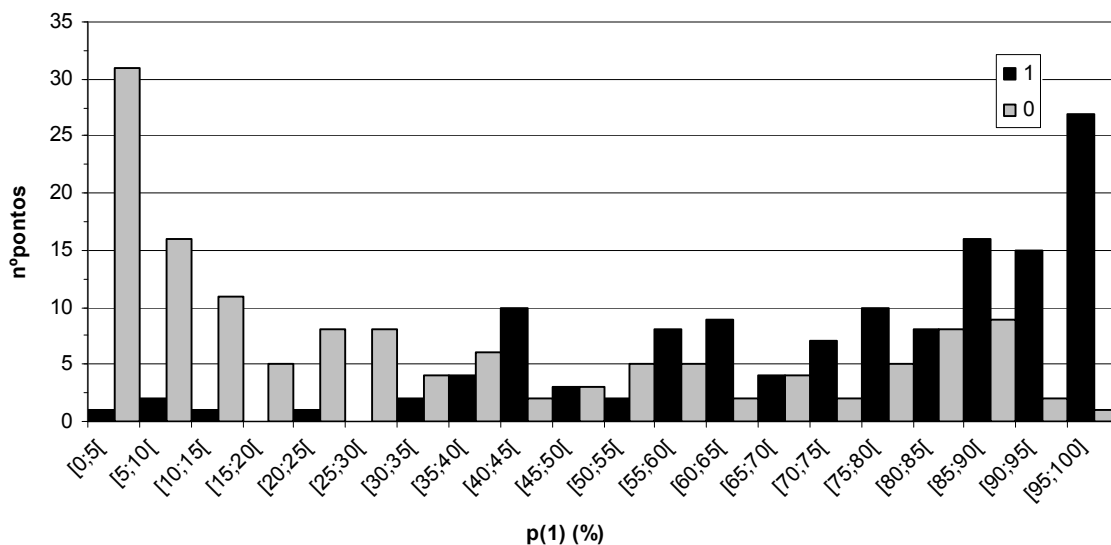


Figura 85 - Distribuição dos pontos sobre áreas entalhadas (1) e não entalhadas (0) pelos valores de probabilidade gerados usando o modelo centrado nas áreas de desembocadura com melhor capacidade discriminante (74,9% de classificações correctas).

3.3.3. Padrões gerais de dimensão, forma e localização: integração dos resultados

Os testes de diferenciação estatística na Tabela 65, juntamente com os diagramas de extremos e quartis na Figura 78, mostraram que as formas se desenvolveram a distâncias relativamente pequenas da desembocadura das respectivas bacias. Ocupam secções das vertentes

relativamente côncavas em termos planares e convexas em perfil, e com valores de Índice de Potência do escoamento relativamente elevados em comparação com a topografia envolvente. Apesar das diferenças entre áreas entalhadas e não entalhadas se terem mostrado estatisticamente significativas para as quatro variáveis acima descritas⁷⁶, a sua aplicação à regressão logística mostrou que apenas a distância à desembocadura permite prever a presença das formas. O modelo resultante previu corretamente 68,9% dos pontos de um conjunto de validação independente (Tabela 69), mas revelou-se fracamente ajustado aos dados de acordo os testes de qualidade realizados⁷⁷.

O facto de as variáveis topográficas não se terem revelado significativas no modelo de previsão obtido (apesar das diferenças estatisticamente significativas previamente observadas) sugeriu que, a existir, o controlo exercido pela topografia antecedente sobre a presença de complexos de ravinas poderia ter expressão não na generalidade das áreas actualmente erodidas, mas apenas numa parte. Em confirmação desta hipótese, centrou-se a atenção nos sectores de desembocadura das formas, assumidos como locais de iniciação.

Primeiramente, testes de diferenciação estatística mostraram que os complexos de ravinas se originaram em locais com maior convergência de escoamento (elevadas áreas de drenagem), declives mais acentuados, e topografia relativamente côncava, tanto em termos planares como de perfil. Como consequência desta topografia, apresentam também valores significativamente mais elevados em ambos os índices topográficos usados (Índice de Potência do Escoamento e Índice Topográfico de Encharcamento).

O modelo de regressão logística subsequentemente construído permitiu definir que, apesar dos resultados dos testes de diferenciação estatística, apenas a distância à desembocadura da bacia, o declive, a curvatura de perfil e o Índice Topográfico de Encharcamento permitem significativamente prever os locais de iniciação das formas. O modelo classificou correctamente 74,9% dos pontos no conjunto de validação (Tabela 76), obtendo resultados superiores ao modelo anterior em todos os testes de qualidade realizados (Tabela 74). De acordo com os resultados, ficou claro que para além de se originarem em relativa proximidade aos sectores terminais das bacias, as formas surgiram em topografia relativamente declivosa, de perfil côncavo (promovendo a desaceleração do escoamento) e com tendência para a acumulação de água sub-superficial (elevado *ITE*).

É relevante que a área de drenagem e o Índice de Potência do Escoamento não tenham sido considerados significativos no modelo construído. Este facto sugere que, não sendo

⁷⁶ Distância à desembocadura, curvatura planar, Curvatura de perfil e Índice de Potência do Escoamento.

⁷⁷ Teste de ajustamento de Hosmer e Lemeshow e pseudo-R² de Nagelkerke (Tabela 68).

controlado pela erosividade elevada do escoamento proveniente de montante, o surgimento das formas terá antes estado associado à dinâmica fluvial a jusante. Esta noção é reforçada pelo facto de o modelo ter deixado clara a importância da acumulação de escoamento sub-superficial (ITE) e da desaceleração do escoamento (concauidade de perfil), ambos promovendo a infiltração, o elevado teor de água no rególito e uma resistência tangencial reduzida. Nestas condições, um entalhe originado na rede de drenagem colectora dos actuais complexos de ravinas promoveria a activação das cabeceiras existentes na rede e o surgimento de novas cabeceiras na forma de colapsos nas paredes dos canais, dando origem a ravinas de desnível (e.g. Figura 1). Este hipotético entalhe afigura-se assim como o factor de iniciação mais plausível, seja em função de uma descida no nível de base ou da ocorrência de episódios excepcionais de precipitação (produzindo elevados volumes de escoamento).

A aplicação da regressão linear múltipla permitiu definir que, após o surgimento das formas, o seu desenvolvimento terá sido controlado de forma fundamental pela quantidade de escoamento disponível a partir de montante⁷⁸ (Tabela 63), em acordo com a noção de uma iniciação na actual desembocadura⁷⁹.

Os modelos de regressão obtidos permitiram atribuir apenas uma parte residual da variância explicada ao declive e ao encharcamento, mostrando maiores perímetros (Pr) e sinuosidades ($Pr-Pcirc$) em associação a declives mais suaves e a uma maior tendência para a concentração da água sub-superficial. É interessante notar que o papel do declive no surgimento e desenvolvimento é precisamente o oposto: os locais de iniciação associam-se a topografia relativamente declivosa face à envolvente (Figura 84 (a) e Tabela 74), mas as formas que se desenvolveram mais foram tendencialmente aquelas associadas a vertentes com declives mais suaves. Estas relações foram confirmadas pelos resultados das análises bivariadas, mostrando associações significativas entre área, perímetro e sinuosidade, por um lado, e declive e *ITE* por outro (Tabela 57; Figura 76), e sugerindo uma expansão das formas dominada pelos colapsos nas paredes e cabeceiras, por oposição à regressão das cabeceiras com base no entalhe pelo escoamento superficial.

Finalmente, a análise das relações entre as características morfológicas consideradas (área, perímetro e sinuosidade) sugeriu uma sequência evolutiva geral em que o desenvolvimento

⁷⁸ Expressa pela área de drenagem medida com referência à desembocadura.

⁷⁹ Conforme foi já considerado (Figuras 46 e 47), as vertentes do vale da rib^a de Ulme distinguem-se em termos regionais pelos declives e comandos relativamente elevados, com especial incidência nos sectores mais próximos da desembocadura. Estas condições são ideais para a concentração de quantidades relativamente elevadas de escoamento em contextos de alimentação em precipitação. A concentração de grandes complexos de ravinas neste contexto topográfico particular sugere que as áreas de drenagem relativamente extensas por ele possibilitadas podem ter sido um factor crítico no desenvolvimento das formas até ao seu estado actual.

inicial em perímetro e área é, a partir de certo ponto, marcado por um incremento na taxa de aumento em área (Figuras 76 (a) e 77). Todo o crescimento é acompanhado de uma sinuosidade progressivamente maior (Figs. 76 (d) e (e)). Estes resultados, tal como os anteriormente descritos, estão em consonância com a noção de uma evolução dominada pela expansão e bifurcação de cabeceiras através de movimentos de massa, produzindo uma forma cada vez mais extensa e de contornos mais sinuosos e menos lineares.

Em suma, a integração dos resultados das várias análises sugere que os complexos de ravinas estudados se terão iniciado com base num entalhe da rede de drenagem, seja em função de uma descida no nível de base das bacias ou de episódios de escoamento excepcional. A regressão das cabeceiras das linhas de água e de novas cabeceiras (formadas nas paredes dos canais graças aos elevados gradientes hidráulicos) teria, nas condições topográficas adequadas (elevado declive, concavidade de perfil e tendência para o encharcamento) tomado a forma de um alargamento e bifurcação sucessivos através de movimentos de massa. A partir desta fase inicial, a evolução destas cabeceiras terá sido controlada essencialmente pela quantidade de escoamento proveniente de montante, em particular sub-superficial, promovendo a sua expansão e bifurcação continuadas.

4. Morfologia, processos e factores: uma caracterização da dinâmica actual e recente

A metodologia e os resultados anteriormente descritos permitiram uma visão de conjunto sobre o surgimento e a evolução dos sistemas de ravinas nas duas bacias em estudo. Nesta segunda e última etapa da terceira parte do trabalho foi adoptada uma perspectiva de pormenor, centrando a atenção num conjunto mais reduzido de formas e nas vertentes em que se desenvolveram. Esta última parte conclui assim um processo de análise que se pretendeu progressivamente mais detalhado e de âmbito mais restrito, abarcando primeiramente uma área de dimensões regionais, depois duas pequenas bacias nela inseridas, e finalmente um conjunto reduzido de formas, estudadas com o máximo detalhe.

No Capítulo I (I.6), foi proposto que uma ravina (ou sistema de ravinas) pode ser abordada como uma conjugação variável ao longo do tempo entre a morfologia, os processos que sobre ela agem, e os factores de controlo destes últimos. Usando este enquadramento conceptual como ponto de partida, procurou-se investigar em detalhe a morfologia e os processos que um conjunto de 30 complexos de ravinas apresenta actualmente, bem como as relações entre estas componentes e diferentes factores de controlo.

Após a selecção de 30 dos 90 sistemas de ravinas anteriormente caracterizados, procurando abranger a variabilidade encontrada em termos de dimensões, começou-se por caracterizar as formas quanto a um conjunto de 30 indicadores morfológicos, recorrendo-se para isso ao levantamento dGPS que já foi descrito em III.2.1 (erros obtidos caracterizados na Tabela 40). A localização do conjunto das formas em relação às duas bacias é apresentada no Anexo 2. Nos Anexos 2-A a 2-C são apresentados extractos da Carta Militar de Portugal mostrando em pormenor a localização de cada uma das 30 formas.

De forma a minorar as limitações impostas pelo levantamento, designadamente o facto de apenas descrever a variação ao longo dos perímetros das formas⁸⁰, recorreu-se à construção de MNE com base na estéreo-restituição de fotografias aéreas recentes (2006)⁸¹, o que permitiu associar uma componente volumétrica aos indicadores morfológicos adoptados. A metodologia e os valores são descritos em 4.1, sendo a totalidade dos indicadores sujeita a regressão linear simples e análise em componentes principais em 4.1.8 a fim de investigar relações e padrões morfológicos.

Os processos geomorfológicos associados a cada forma foram depois sistematicamente caracterizados através de observação de campo. A metodologia e os resultados deste levantamento são apresentados em 4.2, sendo investigadas em 4.3 as relações entre os processos observados e os padrões morfológicos anteriormente definidos.

Cada complexo de ravinas foi finalmente caracterizado quanto a um conjunto de potenciais factores de controlo (4.4), obtidos com base na cartografia topográfica 1:10000 (à semelhança do que já foi feito em III.2). Esta análise de maior pormenor incluiu também a caracterização dos materiais em que as várias formas evoluíram (4.4.1.1), e foi seguida por uma análise das relações entre estes factores de controlo e a morfologia dos complexos de ravinas (4.5), e entre os factores e os processos observados nas formas (4.6).

É aqui de sublinhar a correspondência entre a sequência de análises acima descrita e o enquadramento conceptual proposto em I.6. Sendo uma ravina, ou sistema de ravinas, abordado como uma conjugação entre morfologia, processos, e os factores de controlo destes últimos ao longo do tempo, mais não se procurou fazer do que analisar as possíveis relações

⁸⁰ Embora fosse ideal levantar tanto o perímetro como o interior das formas, as grandes dimensões destas e especialmente as dificuldades causadas pela vegetação densa e espinhosa que ocupa os fundos, constituída muito especialmente por silvas (*Rubrus sp.*), tojo (*Ulex sp.*) e a invasiva exótica localmente designada *salina* (*Hakea Sericea*) tornou tal impossível.

⁸¹ O processo de estéreo-restituição fotogramétrica, realizado com fotografias de 1970 e 2006, foi levado a cabo na empresa Municipia S.A. A mesma empresa é a produtora da cobertura fotográfica de 2006, produzida para a Associação de Municípios da Lezíria do Tejo, e da resultante cartografia topográfica 1:10000, utilizada no trabalho.

entre estas três componentes para o conjunto de 30 formas em estudo, tal como é esquematizado na Figura 86.

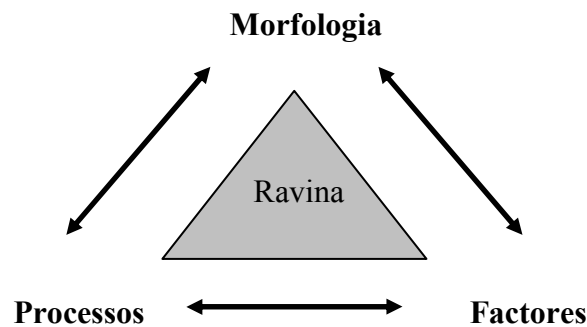


Figura 86 - Uma representação gráfica do enquadramento conceptual do ravinamento que serviu de referência às análises realizadas sobre os 30 sistemas de ravinas.

Finalmente, foram também produzidos MNE das formas com base em fotografias de 1970, a fim de investigar a sua evolução ao longo do período de 36 anos decorrido entre essa data e 2006. Procurou-se desta forma complementar o conhecimento do estado actual dos sistemas de ravinas com o da sua dinâmica nas décadas recentes (4.7).

Por último, os resultados anteriormente descritos foram conjugados a fim de estabelecer uma perspectiva integral das relações entre morfologia, processos e factores de controlo entre as 30 formas analisadas (4.8). Em suma, procurou-se responder nesta última parte do trabalho a três questões-chave:

(1) que combinações de forma e processos apresentam actualmente os sistemas de ravinas em análise e a que factores de controlo estão estas combinações associadas?

(2) até que ponto é possível, com base nestas combinações, definir padrões típicos de evolução (recorrendo à já adoptada abordagem da substituição de espaço por tempo, ou *location for time substitution*)?

(3) Como evoluíram as formas nas últimas décadas, e quais os factores que determinaram essa evolução?

Estas questões específicas encontram reflexo nas grandes questões de investigação definidas no Capítulo I.6⁸².

⁸² Designadamente as questões 1,2,3 e 5.

4.1. Morfologia

4.1.1. Área, perímetro, sinuosidade e grau de desenvolvimento

A área (Ar) e o perímetro (Pr) foram já calculados no Capítulo III.2.2.2, tendo os métodos adoptados para o seu cálculo sido descritos. De forma a facilitar a leitura do presente capítulo, porém, optou-se por apresentar novamente os valores obtidos.

O indicador de sinuosidade adoptado ($Pr-P_{circ}$, correspondente à diferença entre o perímetro da forma e o perímetro de um círculo de igual área) foi já considerado em III.2.3 com respeito às 90 formas foto-interpretadas, tendo sido calculado novamente aplicando a mesma metodologia aos 30 valores de perímetro levantados com dGPS. O mesmo ocorreu com o indicador de desenvolvimento anteriormente aplicado ao conjunto de 90 formas foto-interpretadas (Ar/Ad_{des} , ou a razão entre a área das formas e a sua área de drenagem medida na desembocadura; vd. III.2.6). Os valores das quatro variáveis são apresentados na Tabela 78.

4.1.2. Comprimento

O comprimento das formas ($Comp$, m) foi calculado levando em conta a variação altimétrica, de forma a evitar as sub-estimações inevitavelmente associadas a medições planimétricas que já foram consideradas com alguma profundidade em III.2.2.3. Para isso, começou-se por definir um segmento de recta entre o limite montante da cabeceira e o centro da desembocadura de cada forma (usando os polígonos com os seus limites levantados com dGPS como referência), procurando-se mantê-lo o mais equidistante possível das duas paredes envolventes, e o mais paralelo possível a ambas (Figura 87). Finalmente, utilizou-se a ferramenta *Add Surface Information*⁸³ do ArcGIS 9.1 para obter o comprimento real de cada segmento de acordo com as altitudes extraídas do tema com a topografia reconstruída (vd. III.2.5.1). Os valores obtidos são mostrados na Tabela 79.

⁸³ Esta ferramenta executa automaticamente uma sequência de procedimentos semelhante àquela adoptada no cálculo dos perímetros reais, descrita em III.2.2.1.

Tabela 78 - Valores de Área (Ar), Perímetro (Pr), Sinuosidade ($Pr-Pcirc$), e razão Área real/Área de drenagem na desembocadura (Ar/Ad_{des}) calculados para as 30 formas.

Código	Ar (m ²)	Pr (m)	Pr-Pcirc (m)	Ar/Ad _{des}
F01	444,0	95,6	20,9	0,32
F02	1351,3	201,2	70,9	0,52
F03	1585,3	193,4	52,3	0,55
F04	255,0	68,8	12,2	0,44
F05	4482,4	327,6	90,3	0,74
F06	1041,5	163,0	48,6	1,64
F07	2866,3	274,5	84,7	0,69
F08	11227,2	485,0	109,4	0,48
F09	1104,8	214,7	96,9	0,34
F10	3690,2	306,1	90,8	0,87
F11	729,3	128,9	33,2	0,26
F12	2163,1	262,5	97,6	0,71
F13	993,9	156,9	45,1	1,31
F14	948,6	198,4	89,2	0,17
F15	4881,0	366,8	119,1	0,84
F16	986,4	132,0	20,7	0,04
F17	745,0	131,7	34,9	0,23
F18	3867,8	309,2	88,7	0,50
F19	1361,5	158,5	27,7	0,64
F20	2438,1	237,8	62,8	0,17
F21	467,4	102,8	26,2	0,54
F22	636,8	130,1	40,6	0,34
F23	1175,8	214,2	92,6	0,44
F24	1276,2	209,1	82,5	0,15
F25	589,1	118,7	32,7	0,48
F26	5533,8	711,9	448,2	0,55
F27	14000,0	894,9	475,5	0,44
F28	232,8	67,9	13,8	0,42
F29	984,1	145,5	34,3	0,41
F30	33378,4	1394,5	746,9	0,66
Média	3514,6	280,1	109,6	0,53
Min	232,8	67,9	12,2	0,04
Max	33378,4	1394,5	746,9	1,64
DP	6338,43	272,5	158,0	0,32
Total	105437,1	8402,2		

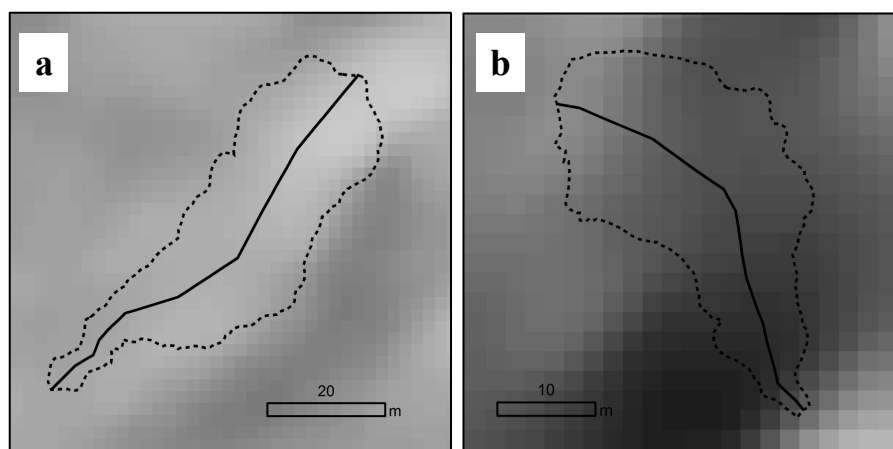


Figura 87 - Dois exemplos das linhas construídas a fim de caracterizar as formas quanto ao comprimento (linhas a cheio): (a) forma F02; (b) forma F22. Os fundos consistem em relevos de sombras (*hillshade*) produzidos com base na topografia reconstruída.

Tabela 79 - Comprimentos estimados para as 30 formas.

Código	Comp (m)	Código	Comp (m)
F01	27,44	F16	42,84
F02	82,68	F17	47,90
F03	72,20	F18	93,30
F04	23,80	F19	53,92
F05	121,57	F20	86,74
F06	51,35	F21	36,69
F07	108,54	F22	48,00
F08	157,17	F23	77,67
F09	69,93	F24	83,42
F10	98,44	F25	37,36
F11	41,13	F26	155,32
F12	97,81	F27	295,47
F13	44,41	F28	23,59
F14	70,17	F29	55,37
F15	127,73	F30	386,32
Média 90,61			
Min 23,59			
Max 386,32			
DP 76,51			

4.1.3. Variáveis baseadas na largura

Com relação à largura das formas, calcularam-se seis indicadores diferentes: para além da largura média (Lm), considerada face à totalidade de cada um dos complexos de ravinas, associaram-se valores especificamente aos sectores montante (Lm_{mon}), intermédios (Lm_{int}), e jusante (Lm_{jus}), procurando levar em conta a variação ao longo de cada forma. Ao mesmo tempo, adoptou-se o índice Lm_{mon}/Lm_{jus} , com vista a comparar os sectores junto à cabeceira (assumidos como os focos fundamentais da dinâmica regressiva) com os sectores próximos das desembocaduras (assumidos como locais de iniciação).

Finalmente, conjugou-se a largura média com o comprimento (vd. 4.1.2), procurando-se com a razão entre ambas as variáveis obter um indicador do alongamento geral da forma.

Começou-se por dividir cada um dos segmentos longitudinais utilizados para definir o comprimento em sete segmentos iguais⁸⁴. Construíram-se depois linhas perpendiculares aos extremos de cada um destes segmentos, na prática dividindo cada forma em sete sectores. Estas linhas foram depois medidas levando em conta as variações no declive com a ferramenta *Add Surface Information*, à imagem do que foi descrito para o comprimento.

Em ordem a caracterizar as larguras típicas ao longo de cada forma, optou-se por não considerar os sectores extremos, dado que os limites destes sectores correspondentes à

⁸⁴ Foi usada a ferramenta *Split* do ArcGIS 9.1.

cabeceira e à desembocadura tendem a reduzir-se a valores próximos de 0, sendo muito semelhantes para todas as formas não obstante a sua dimensão. Adoptaram-se antes os sectores adjacentes aos extremos e o sector intermédio, conforme esquematizado na Figura 88. A largura de cada sector foi obtida calculando a média dos comprimentos dos segmentos que o limitam. Tomando como referência a Figura 88, a largura média do sector montante (Lm_{mon}) será a média dos comprimentos dos segmentos 1 e 2, sendo adoptados os segmentos 3 e 4 para o sector intermédio (Lm_{int}), e 5 e 6 para o jusante (Lm_{jus}). A largura média para a totalidade de uma dada forma ($Lmed$) consistiu na média dos comprimentos dos seis segmentos transversais ao seu comprimento longitudinal. Todos os valores obtidos são apresentados na Tabela 80.

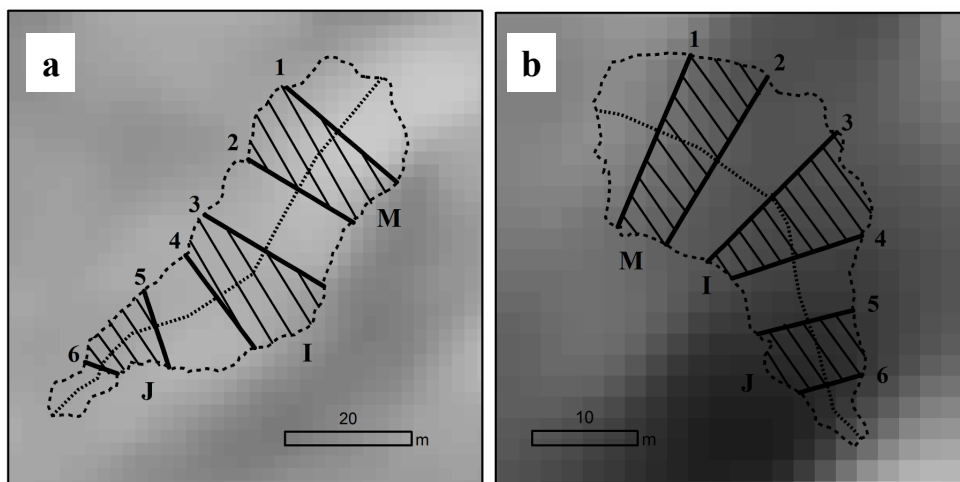


Figura 88 - Dois exemplos da divisão em sectores adoptada para caracterizar a largura das formas, usando as mesmas duas formas da Figura 87. Os sectores em evidência (linhas diagonais) foram os adoptados para representar as larguras no sector montante das formas (M), sector intermédio (I) e sector jusante (J). Os segmentos de recta numerados de 1 a 6 são os limites entre sectores sucessivos.

4.1.4. Volume

Em ordem a obter o volume das formas, recorreu-se à estéreo-restituição de fotografias aéreas analógicas de 2006 de escala 1:30000, levada a cabo pela Municípa S.A. A mesma empresa realizou o vôo fotogramétrico original e produziu, a partir das mesmas fotografias e sob encomenda da Comunidade Intermunicipal da Lezíria do Tejo, a cartografia topográfica 1:10000 já adoptada no presente trabalho. Foi possível beneficiar grandemente dos resultados desse projecto, já que a digitalização (com resolução de 15 micra) e a triangulação aérea das fotografias já tinha sido realizada, sendo apenas necessário restituir conjuntos de pontos cotados correspondentes aos complexos de ravinas em estudo. A triangulação, realizada para

a globalidade da área abrangida pelo projecto de cartografia (aproximadamente 371351 hectares), recorreu a 105 pontos de apoio e 220 vértices geodésicos. A transformação geométrica deste conjunto de 325 pontos aerotriangulados permitiu obter erros médios quadráticos horizontais (x,y) de 0,13 m e verticais (z) de 0,26 m.

Procurou-se, durante a fase de restituição fotogramétrica, obter a máxima densidade possível de pontos no interior das formas, tendo o processo resultado numa média de um ponto cotado por cada 20,8 m² de superfície erodida.

Tabela 80 - Variáveis relacionadas com a largura: *Lmed* - largura média; *Lm_mon*, *Lm_int* e *Lm_jus* são as larguras médias nos sectores montante, intermédio e jusante; *Comp/lmed* é a razão entre o comprimento da forma (vd. Tabela 79) e a sua largura média.

Código	Lmed (m)	Lm_mon (m)	Lm_int (m)	Lm_jus (m)	Lm_mon/ Lm_jus	(Comp/Lmed)
F01	16,12	21,89	17,09	9,38	2,33	1,70
F02	16,98	21,35	20,36	9,22	2,31	4,87
F03	24,78	34,84	29,38	10,12	3,44	2,91
F04	11,48	13,03	14,43	7,00	1,86	2,07
F05	40,36	39,41	45,85	35,81	1,10	3,01
F06	20,62	20,26	27,57	14,05	1,44	2,49
F07	28,72	26,45	31,02	28,68	0,92	3,78
F08	80,37	70,18	99,49	71,43	0,98	1,96
F09	15,73	17,55	15,50	14,12	1,24	4,45
F10	40,79	50,77	43,35	28,23	1,80	2,41
F11	18,66	17,44	23,18	15,36	1,14	2,20
F12	23,19	37,60	23,30	8,68	4,33	4,22
F13	22,31	29,90	21,63	15,39	1,94	1,99
F14	13,70	14,84	13,09	13,18	1,13	5,12
F15	42,29	55,98	52,22	18,67	3,00	3,02
F16	23,17	26,46	27,88	15,16	1,75	1,85
F17	16,35	18,66	18,14	12,27	1,52	2,93
F18	44,17	51,44	51,79	29,28	1,76	2,11
F19	26,39	35,88	29,09	14,18	2,53	2,04
F20	31,29	44,36	32,49	17,03	2,60	2,77
F21	12,17	12,46	14,72	9,32	1,34	3,02
F22	14,06	18,16	15,61	8,42	2,16	3,41
F23	15,80	19,44	20,18	7,78	2,50	4,92
F24	17,37	18,29	19,88	13,96	1,31	4,80
F25	16,67	18,46	20,95	10,58	1,74	2,24
F26	40,42	37,25	63,67	20,36	1,83	3,84
F27	49,18	81,12	41,42	24,99	3,25	6,01
F28	9,95	8,75	11,19	9,91	0,88	2,37
F29	18,83	16,84	22,43	17,21	0,98	2,94
F30	99,27	132,04	116,02	49,73	2,66	3,89
Média	28,37	33,70	32,76	18,65	1,93	3,18
Min	9,95	8,75	11,19	7,00	0,88	1,70
Max	99,27	132,04	116,02	71,43	4,33	6,01
DP	19,76	25,12	23,88	13,57	0,83	1,14

A metodologia adoptada consistiu em quatro passos: (1) construção de MNE das 30 formas, incluindo a topografia interior; (2) construção de MNE eliminando do processo de interpolação os pontos no interior dos perímetros, o que teve como resultado uma

aproximação à topografia pré-erosão; (3) após conversão para estrutura matricial, os modelos foram sobrepostos, o que permitiu subtrair a altimetria da topografia erodida à altimetria reconstruída; a operação resultou, para cada célula, na diferença altimétrica aproximada entre a vertente original e a forma actual; (4) finalmente, estes valores foram multiplicados pela área correspondente a cada célula (4 m^2), em ordem a obter um valor de volume, e os perímetros foram usados como referência para a soma dos volumes associados a todas as células no seu interior, obtendo-se assim o volume total erodido associado a cada complexo de ravinas.

Cada um dos passos é descrito de seguida⁸⁵.

Começou-se por interpolar MNE para as superfícies antecedentes e actuais das 30 formas. Os resultados já apresentados na Tabela 50 (vd III.2.5.1) mostraram que apesar de o algoritmo *Topo to Raster* reproduzir mais aproximadamente a topografia real quando corrido sobre curvas de nível, produz erros maiores do que o TIN quando corrido exclusivamente sobre pontos cotados, o tipo de informação disponível nesta fase do trabalho. Assim, experimentou-se o segundo método que obteve melhores resultados, este originalmente corrido usando pontos cotados como *input* (*Spline* Regularizado com $w = 0,033$; erro absoluto médio apenas 6 mm superior; vd. Tabela 51). Porém, a superfície resultante revelou uma suavização excessiva, sendo irrealista quando comparada com a superfície produzida usando o *Topo to Raster*. Dado que o contexto topográfico foi exactamente o mesmo, pode assumir-se que este resultado inferior se deve a diferenças na informação de *input*: aquela originalmente usada consistia em curvas de nível 1:10000 convertidas para pontos e abrangendo a totalidade das bacias em estudo, sendo que estes pontos reproduziam muito aproximadamente a configuração original das linhas. Em contraste, o *input* agora adoptado consistiu numa mancha irregular de pontos cotados sem qualquer configuração linear, com uma muito menor densidade, e abrangendo apenas algumas centenas de metros em redor das formas em estudo.

⁸⁵ É importante referir que a utilização dos pontos estéreo-restituídos, apesar de imprescindível para a obtenção do volume das formas, acarretou perda de rigor na definição dos perímetros em comparação com os pontos dGPS anteriormente obtidos. Esta situação poderia ser em certa medida evitada combinando ambos os temas, i.e. usando os perímetros dGPS para limitar a interpolação dos pontos restituídos no interior de cada forma. Tal aproximação implicaria, porém, erros sistemáticos derivados da combinação de dois temas altimétricos baseados em técnicas tão distintas, bem como a assunção de que não teria existido evolução entre a data do voo (2006) e a data do levantamento de campo (2011-2012). Neste contexto, optou-se por calcular os volumes usando exclusivamente os pontos restituídos, considerando-se que a perda de rigor relativa aos perímetros em termos absolutos não prejudicou de forma alguma a manutenção dos valores relativos de volume entre as 30 formas estudadas, essencial para as análises posteriormente realizadas no âmbito dos objectivos definidos para esta parte do trabalho.

Dadas estas limitações, optou-se por recorrer à interpolação linear (TIN) nesta fase do trabalho, assumindo-se que os erros associados não tiveram relevância nas análises subsequentes.

Começou-se por unir em polígonos os pontos restituídos que marcam os limites das formas, usando como referência visual um TIN construído com base em todos os pontos restituídos. O resultado desta operação foi um tema com 30 polígonos que depois foi usado como limite à interpolação de um segundo TIN, este contendo só os pontos integrados nos sistemas de ravinas em estudo, e incluindo a topografia interior das formas.

Em ordem a obter uma representação aproximada da topografia original, foi repetida a interpolação usando apenas os pontos restituídos sobrepostos ao contorno dos polígonos. São apresentados na Figura 89 como exemplo os dois MNE da mesma forma (código F02), mostrando a topografia actual e a aproximação à reconstituição da superfície original.

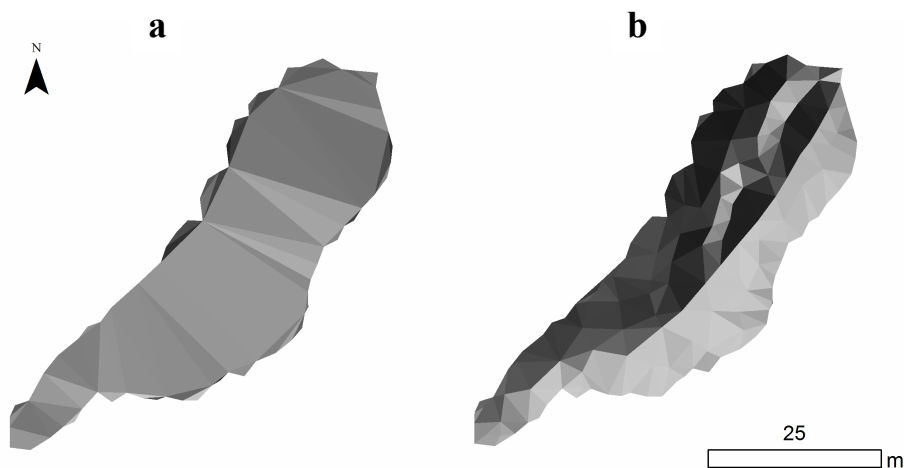


Figura 89 - Exemplo dos modelos TIN da aproximação à topografia pré-erosão (a) e da topografia em 2006 (b), obtidos com base nos pontos estéreo-restituídos, e usando como exemplo a forma F02.

Os modelos TIN foram depois convertidos para estrutura matricial (resolução 2 m). Tomando como referência o modelo com a superfície topográfica reconstruída, subtraiu-se-lhe o MNE representando as formas erosivas. O volume associado a cada célula foi depois obtido multiplicando o valor da diferença altimétrica pela área da célula (4 m^2), sendo o volume total de cada forma o somatório dos valores das células abrangidas pelo respectivo perímetro⁸⁶.

Formalmente,

$$Vol = \sum_{i=1}^n (Ar_i - Ae_i) \cdot 4$$

⁸⁶ O somatório dos volumes por forma foi obtido usando a ferramenta *Zonal Statistics* do ArcGIS 9.1.

sendo Vol (em m^3) o volume para qualquer um dos 30 sistemas de ravinas abrangendo n células individuais e Ar e Ae (em m) as altitudes de cada célula i , respectivamente nos MNE com a topografia reconstruída e erodida. Esta metodologia tem sido várias vezes aplicada à quantificação da evolução de grandes sistemas de ravinas, combinando MNE temporalmente sequenciais (e.g. DeRose *et al.* 1998: 1051; Martínez-Casasnovas 2003: 298; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2003: 448). Os resultados são apresentados na Tabela 81.

Tabela 81 - Volumes obtidos com base nos pontos estéreo-restituídos.

Código	Vol (m³)	Código	Vol (m³)
F01	1236,7	F16	3450,5
F02	5234	F17	1799
F03	4282,5	F18	31756,8
F04	442,4	F19	4112,3
F05	29154	F20	12045,3
F06	2384,9	F21	1010,1
F07	15085,1	F22	1914,1
F08	105251,3	F23	2858,6
F09	2440,8	F24	4678,7
F10	23395,5	F25	1394,9
F11	1819,5	F26	19974,8
F12	7899,3	F27	109509,2
F13	1573,6	F28	454,2
F14	1585,5	F29	2447,7
F15	33986,9	F30	398443,1
Média	27720,7		
Min	442,4		
Max	398443,1		
DP	73781,5		
Total	831621,1		

4.1.5 Variáveis baseadas na profundidade

Procurou-se caracterizar a profundidade do entalhe originado por cada sistema de ravinas na topografia onde evoluiu com recurso a um total de 9 variáveis. Destas, as profundidades média (Pf_{med}) e máxima (Pf_{max}) dizem respeito à totalidade de cada forma. Em contraste, procurou-se caracterizar a variação do entalhe no interior dos sistemas de ravinas em estudo calculando as profundidades médias nos sectores montante (Pf_{mon}), intermédio (Pf_{int}) e jusante (Pf_{jus}) com recurso à mesma divisão já descrita para a largura em 4.1.3 e ilustrada na Figura 88.

Adoptou-se também a razão entre a largura e a profundidade (L_{med}/Pf_{med}) como um índice da forma do perfil transversal: valores mais elevados serão indicativos de um perfil relativamente mais suave e alargado, sendo um perfil entalhado representado por valores mais reduzidos. Tal como foi feito para a profundidade, este indicador foi calculado para a

totalidade da forma e para os três sectores característicos adoptados: montante (L_{med}/P_{fmed_mon}), intermédio (L_{med}/P_{fmed_int}) e jusante (L_{med}/P_{fmed_jus}).

As profundidades média e máxima para a totalidade da forma foram obtidas a partir do tema que resultou da subtracção do MNE com a topografia erodida daquele com a topografia reconstruída (vd. III.4.1.4). Efectuou-se o cálculo da profundidade máxima, usando os polígonos com os limites das formas como zonas e extraíndo do tema com a diferença de altitudes o valor máximo registado pelas células integradas em cada complexo de ravinhas.

A profundidade média foi calculada com recurso aos seis limites de sector definidos ao longo do comprimento longitudinal de cada forma (Figura 88). Usou-se cada linha de limite de sector como zona, extraíndo-se o valor máximo de profundidade associado. Estes valores corresponderam à profundidade máxima do canal nas seis secções transversais, cuja média foi calculada como a profundidade média da forma.

Finalmente, e exactamente como já descrito em III.4.1.3 para a largura, obteve-se a profundidade média nos três sectores de referência calculando a média das profundidades máximas ao longo das secções que os delimitam.

Os resultados são apresentados na Tabela 82.

4.1.6. Variáveis baseadas no declive

Foi definido um conjunto de variáveis com o propósito de caracterizar a inclinação das paredes, laterais e de cabeceira, dos complexos de ravinhas. Não foram considerados especificamente os fundos, já que a observação de campo tornou claro que frequentemente não há uma separação clara entre estes e as paredes.

Começou-se por definir o declive médio nos sectores de cabeceira (D_{cab}), montante (D_{mon}), intermédios (D_{int}) e jusante (D_{jus}), com todos os valores em graus. Para isso, os polígonos com os limites estéreo-restituídos foram divididos⁸⁷ usando como referência os limites de sector anteriormente definidos (cf. Figura 88). Dos vários polígonos resultantes, foram apenas mantidos os correspondentes aos sectores desejados (Figura 90) num total de quatro por forma. Este tema serviu depois para produzir, através de selecção e exportação, um tema cartográfico para cada um dos quatro sectores a analisar.

⁸⁷ Foi usada a ferramenta *Cut Polygon*, do menu de edição vectorial do ArcGIS 9.1.

Foi por fim construído um tema de declives a partir do MNE com as formas no seu estado actual⁸⁸, sendo usados os temas poligonais dos vários sectores para calcular o declive médio no interior de cada um através da ferramenta *Zonal Statistics*.

Os valores resultantes são apresentados na Tabela 83.

Tabela 82 - Variáveis relacionadas com a profundidade. *Pf_max* (m) - Profundidade máxima atingida pela forma; *Pf_med* (m) - profundidade média; *Pf_mon* (m), *Pf_int* (m) e *Pf_jus* (m) - Profundidade média medida especificamente nos sectores montante, intermédio e jusante; *Lmed/Pfmed* - Razão largura média/profundidade média; *Lmed/Pfmed_mon*, *Lmed/Pfmed_int* e *Lmed/Pfmed_jus* - Razão largura média/profundidade média medida especificamente nos sectores montante, intermédio e jusante.

Cód.	Pf_max (m)	Pf_med (m)	Pf_mon (m)	Pf_int (m)	Pf_jus (m)	Lmed/ Pfmed	Lmed/ Pfmed_mon	Lmed/ Pfmed_int	Lmed/ Pfmed_jus
F01	8,08	5,44	7,05	7,23	2,03	2,96	3,10	2,36	4,62
F02	11,44	7,29	10,70	8,22	2,96	2,33	2,00	2,48	3,11
F03	6,43	4,34	5,27	5,81	1,94	5,71	6,62	5,06	5,20
F04	5,75	4,00	4,31	5,02	2,66	2,87	3,02	2,87	2,63
F05	18,17	12,14	15,56	13,35	7,51	3,32	2,53	3,43	4,77
F06	4,79	3,69	2,99	4,69	3,38	5,59	6,77	5,88	4,16
F07	11,77	9,84	10,31	10,73	8,46	2,92	2,56	2,89	3,39
F08	19,05	15,33	14,00	16,99	15,00	5,24	5,01	5,85	4,76
F09	6,93	5,33	5,47	6,54	3,99	2,95	3,21	2,37	3,54
F10	14,63	11,08	13,42	12,40	7,42	3,68	3,78	3,50	3,81
F11	6,24	5,11	5,33	6,08	3,91	3,65	3,27	3,81	3,93
F12	8,86	5,73	8,16	6,65	2,38	4,05	4,61	3,50	3,64
F13	5,26	3,14	4,28	3,38	1,75	7,11	6,99	6,40	8,78
F14	6,17	3,29	5,12	3,64	1,10	4,17	2,90	3,59	11,99
F15	17,45	12,23	16,75	14,75	5,19	3,46	3,34	3,54	3,59
F16	9,15	6,75	7,74	8,47	4,04	3,43	3,42	3,29	3,76
F17	6,68	4,82	4,84	6,45	3,15	3,40	3,85	2,81	3,89
F18	18,68	13,90	17,10	15,18	9,42	3,18	3,01	3,41	3,11
F19	6,74	5,21	5,00	6,55	4,07	5,07	7,18	4,44	3,48
F20	12,31	8,95	10,31	10,77	5,79	3,49	4,30	3,02	2,94
F21	7,36	4,89	6,65	5,61	2,40	2,49	1,87	2,63	3,88
F22	7,94	5,69	6,57	6,35	4,14	2,47	2,76	2,46	2,03
F23	8,02	4,44	6,87	4,76	1,68	3,56	2,83	4,24	4,62
F24	11,24	7,04	9,18	9,11	2,83	2,47	1,99	2,18	4,92
F25	5,63	4,39	3,71	5,35	4,11	3,80	4,97	3,92	2,57
F26	11,07	6,97	9,17	7,55	4,20	5,80	4,06	8,43	4,85
F27	20,78	12,86	19,15	12,35	7,07	3,82	4,24	3,35	3,53
F28	5,53	3,84	4,12	5,51	1,89	2,59	2,12	2,03	5,26
F29	6,28	4,81	4,23	5,89	4,31	3,92	3,98	3,81	3,99
F30	29,78	18,42	24,16	22,13	8,98	5,39	5,47	5,24	5,54
Média	10,61	7,36	8,92	8,58	4,59	3,83	3,86	3,76	4,34
DP	5,84	3,95	5,22	4,34	2,97	1,17	1,49	1,41	1,86
Min	4,79	3,14	2,99	3,38	1,10	2,33	1,87	2,03	2,03
Max	29,78	18,42	24,16	22,13	15,00	7,11	7,18	8,43	11,99

⁸⁸ Este modelo foi obtido a partir do modelo TIN gerado com base na totalidade dos pontos restituídos, descrito em III.4.1.4.

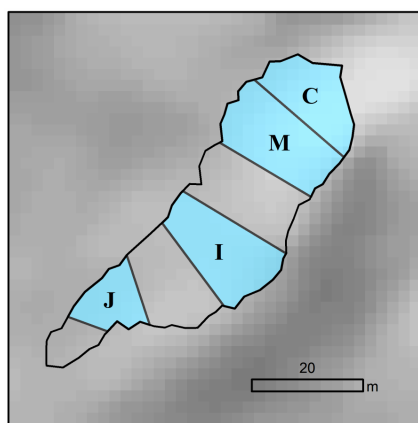


Figura 90 - Sectores de referência utilizados na caracterização morfológica dos complexos de ravinas, usando como exemplo a forma F02: (C) cabeceira; (M) montante; (I) intermédio; (J) jusante.

Para além do declive médio (*D*), considerou-se o declive medido ao longo do fundo das formas (*DF*). Estas duas variáveis são complementares, já que a primeira, ao levar em conta as paredes laterais, caracteriza em grande medida o perfil transversal das formas, enquanto a segunda leva exclusivamente em conta a evolução em termos longitudinais.

A metodologia adoptada em relação ao declive ao longo do fundo das formas dividiu-se em duas fases. Primeiramente, foi delineada a configuração da drenagem no interior de cada complexo de ravinas. Este processo foi realizado visualmente, usando como referência o MNE TIN original, e um tema de escoamento acumulado classificado de forma a mostrar as linhas de drenagem⁸⁹ (Figura 91). Marcaram-se apenas as linhas principais, podendo ocorrer mais do que uma num mesmo sector nos casos em que o fundo fosse dominado por canais de importância semelhante.

Cada linha desenhada incluiu um atributo com um código identificador da forma em estudo, que depois permitiu intersectar o tema linear com o tema poligonal dos sectores de referência, assim associando a cada segmento da rede de drenagem a identificação do sector em que se insere.

⁸⁹ Para a obtenção deste tema, converteu-se o TIN para quadrícula com uma resolução de 0,5 m (de forma a facilitar a visualização das células de escoamento em relação ao TIN), e produziram-se sucessivamente um tema de direcção do escoamento e outro de acumulação do escoamento. Este foi por fim classificado de forma a evidenciar todas as células drenando individualmente pelo menos 60 células.

Tabela 83 - Declive médio por sector. *D_cab* - cabeceira; *D_mont* - sector montante; *D_int* - sector intermédio; *D_jus* - sector jusante. Todos os valores estão em graus.

Forma	D_cab	D_mont	D_int	D_jus
1	44,02	46,35	39,82	31,36
2	52,07	44,68	37,76	26,15
3	36,15	21,03	24,09	20,76
4	53,74	54,26	41,13	30,84
5	43,75	43,29	33,90	24,05
6	43,92	35,77	25,80	20,45
7	44,46	39,82	33,94	28,91
8	41,65	35,36	25,46	26,27
9	39,63	34,66	37,34	27,73
10	42,85	34,40	34,66	27,46
11	41,60	35,97	33,95	27,32
12	34,00	28,11	29,28	23,16
13	27,76	29,77	22,26	15,75
14	35,59	35,64	28,72	30,52
15	43,77	40,22	34,82	35,87
16	56,43	43,99	35,53	28,55
17	37,79	32,02	33,45	34,28
18	53,56	40,57	31,26	29,58
19	50,11	41,37	27,82	27,25
20	41,53	32,69	35,39	32,52
21	55,59	47,10	34,93	31,23
22	47,81	41,92	36,50	37,78
23	43,17	42,03	27,08	20,37
24	48,32	48,31	37,73	23,11
25	38,34	31,92	29,40	32,12
26	38,33	36,45	27,87	20,70
27	38,83	36,90	30,80	30,32
28	32,83	34,79	38,37	49,54
29	39,59	33,01	25,71	24,24
30	33,00	33,54	30,93	25,47
Média	42,67	37,86	32,19	28,12
Min	27,76	21,03	22,26	15,75
Max	56,43	54,26	41,13	49,54
DP	7,04	6,70	4,91	6,34

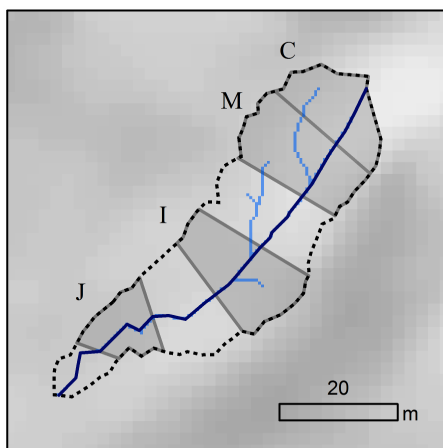


Figura 91- Linhas de drenagem principais definidas a fim de servir de referência ao cálculo do declive no fundo dos sistemas de ravinas. A linha a escuro mostra a drenagem, vectorizada sobre um tema de escoamento acumulado classificado (troços de ordem mais baixa, representados a cor mais clara). Os sectores de referência utilizados (cf. Figura 90) estão evidenciados a cinzento mais escuro e identificados com letras.

Numa segunda fase, foram criados através de selecção e exportação temas com os segmentos especificamente associados a cada um dos sectores. A sua subsequente utilização como zonas na ferramenta *Zonal Statistics* permitiu obter o valor médio das células do tema de declives a que cada um destes segmentos se sobrepôs, i.e. o declive médio percorrido pela drenagem ao longo de fundo de cada sector. Os resultados são apresentados na Tabela 84.

Tabela 84 - Declive médio ao longo do fundo das formas, por sector. *DF_cab* - Cabeceira; *DF_mont* - sector montante; *DF_int* - sector intermédio; *DF_jus* - jusante.

Forma	DF_cab	DF_mont	DF_int	DF_jus
1	53,74	45,07	26,75	35,21
2	48,16	36,24	25,75	19,44
3	33,65	18,34	17,26	16,50
4	51,54	55,97	31,23	26,86
5	44,62	37,82	19,73	17,15
6	40,30	31,78	21,33	17,83
7	38,73	21,96	15,31	12,37
8	33,68	28,41	15,19	17,06
9	34,49	37,34	24,46	26,39
10	44,78	19,57	18,43	13,64
11	40,88	27,38	26,73	25,64
12	38,10	17,51	17,36	14,87
13	27,99	29,95	18,45	11,22
14	32,38	27,72	21,53	23,33
15	42,66	28,38	19,83	14,80
16	51,52	42,39	21,58	19,32
17	37,64	30,45	21,21	26,16
18	45,78	34,57	11,66	12,67
19	44,59	39,85	22,94	17,85
20	37,54	24,04	26,30	28,64
21	51,01	42,56	31,61	34,19
22	43,92	41,99	29,81	32,58
23	40,91	37,79	19,02	17,00
24	43,46	47,26	24,69	15,08
25	36,34	36,34	20,14	23,78
26	32,06	28,55	18,01	6,81
27	28,60	28,41	16,21	25,26
28	24,38	29,52	23,17	49,60
29	37,78	28,48	10,72	16,54
30	25,54	15,97	9,19	7,74
Média	39,56	32,39	20,85	20,85
Min	24,38	15,97	9,19	6,81
Max	53,74	55,97	31,61	49,60
DP	7,67	9,28	5,55	8,99

4.1.7. Concavidade longitudinal

Finalmente, procurou-se descrever o grau de concavidade do perfil longitudinal de cada forma, tendo-se construído com esse fim um índice quantitativo, esquematicamente apresentado na Figura 92. Abordando cada forma numa perspectiva de perfil, e portanto bidimensional, a

sequência de limites entre sectores foi concebida como inscrevendo-se num rectângulo *rt*, definido pelos limites superior e inferior da forma (i.e. os pontos extremos com respeito ao eixo do seu comprimento, tal como apresentado na Figura). No interior do rectângulo, cada conjunto de dois limites sucessivos entre sectores foi concebido como definindo um trapézio *tr* cuja área pode ser definida como o produto da distância planimétrica (*d*) entre ambos e da semi-soma das duas altitudes relativas, i.e. medidas tendo como origem a altitude mínima do rectângulo (o seu ponto terminal). Desta forma, a altitude relativa do seu limite montante *alt1*, as altitudes dos seis limites interiores (*alt2-alt7*, medidas nas linhas de água já definidas⁹⁰) e a altitude do limite jusante *alt8* (invariavelmente 0) configuram, para um dado sistema de ravinas, sete trapézios *tr1* a *tr7*, cujo somatório das áreas será tanto menor em relação à área do rectângulo onde se inscrevem quanto maior a concavidade do perfil do sistema de ravinas. Assim, sendo *atr* a área conjunta dos sete trapézios, ou

$$atr = \sum_{i=1}^7 d_i \cdot \frac{alt_i + alt_{i+1}}{2}$$

e sendo *art* a área do rectângulo onde o perfil da forma está inscrito, ou

$$art = alt_1 \cdot \sum_{i=1}^7 d_i$$

o índice de concavidade *Iconc* é formulado como:

$$Iconc = 1 - \frac{atr}{art}$$

sendo o seu valor tão mais elevado quando mais côncavo for o perfil longitudinal de cada forma.

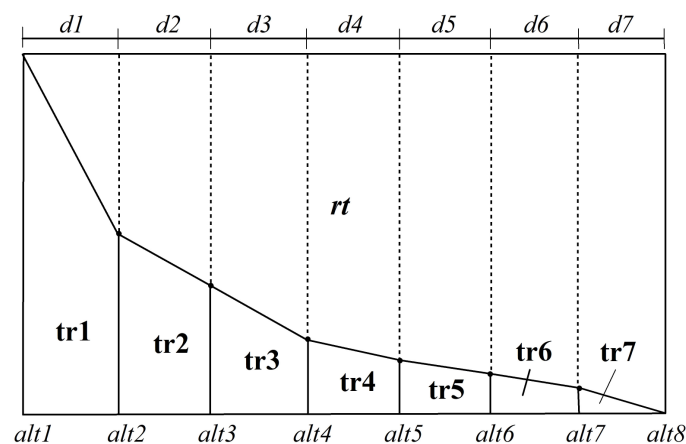


Figura 92 - Esquema dos factores usados no índice de concavidade construído.

⁹⁰ Sempre que duas linhas de água cruzaram o mesmo limite entre sectores, foi utilizada a média das suas altitudes.

Todos os factores necessários ao cálculo do índice (distância entre limites de sector, altitude das linhas de água que intersectam cada limite, altitude máxima e mínima das linhas de água por forma) foram obtidos com base em análises simples no ArcGIS 9.1., sendo os cálculos posteriormente realizados usando o MS Excel. Os resultados são apresentados na Tabela 85.

Tabela 85 - Valores de Índice de concavidade (*Iconc*, adimensional) por forma.

Código	Iconc	Código	Iconc
F01	0,69	F16	0,67
F02	0,68	F17	0,61
F03	0,7	F18	0,77
F04	0,67	F19	0,65
F05	0,7	F20	0,66
F06	0,61	F21	0,63
F07	0,65	F22	0,62
F08	0,67	F23	0,7
F09	0,66	F24	0,66
F10	0,7	F25	0,68
F11	0,64	F26	0,71
F12	0,71	F27	0,68
F13	0,67	F28	0,68
F14	0,58	F29	0,71
F15	0,66	F30	0,64
Min	0,58		
Max	0,77		
Média	0,67		
DP	0,04		

4.1.8. Análise das relações e padrões morfológicos

4.1.8.1. Correlação linear bivariada

Começou-se por analisar as relações bivariadas entre as 30 variáveis construindo uma tabela de correlação linear com recurso ao SPSS 15.0 (Anexo 3). A análise dos resultados permitiu investigar com maior pormenor a natureza das relações consideradas significativas através da construção de gráficos de dispersão e do ajustamento de diferentes funções (à semelhança do que já foi feito em III.3.2). Os resultados são descritos de seguida.

As variáveis referentes à totalidade das formas (por oposição àquelas que descrevem sectores específicos) estão fortemente intercorrelacionadas. Conforme mostra a Figura 93, o aumento dos sistemas de ravinhas em área (*Ar*) é acompanhado por um aumento do perímetro (*Pr*) a taxas progressivamente mais reduzidas, e por um aumento linear em sinuosidade (*Pr-Pcirc*)

confirmando a noção já avançada de uma evolução marcada pela expansão em várias direcções através de múltiplas cabeceiras⁹¹.

Tal como acontece face a Pr , as relações ente Ar e o comprimento ($Comp$), largura média ($Lmed$) e profundidade média ($Pfmed$) são melhor descritas por funções não lineares (Figura 94).

A análise gráfica das relações nas Figuras 93 e 94 sugere desde logo duas etapas gerais de desenvolvimento morfológico: uma etapa inicial marcada por maiores aumentos em perímetro, comprimento, largura e profundidade, e uma etapa subsequente, a que se poderia chamar de decaimento, marcada por um declínio das taxas de crescimento apresentadas pelas quatro variáveis em relação à area. Embora esta mudança nas taxas de evolução não seja clara para $Pfmed$ na Figura 94, resultado da reduzida variação desta variável face à escala do gráfico, torna-se evidente quando se compara $Pfmed$ e Ar num gráfico individual (Figura 95 (a)).

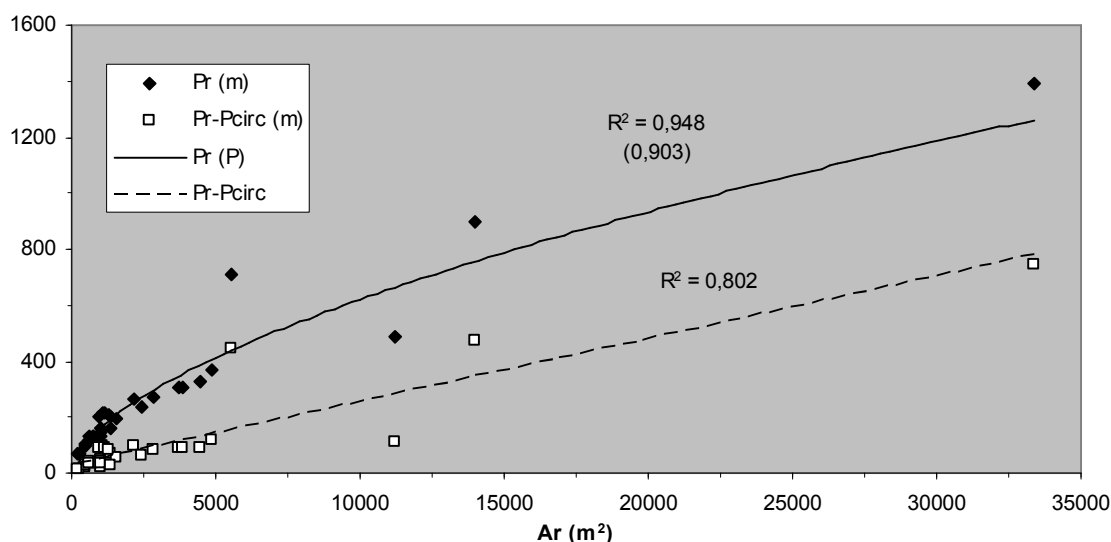


Figura 93 - Relações entre a área (Ar), o perímetro (Pr) e o indicador de sinuosidade ($Pr-Pcirc$) para as 30 formas em análise. As linhas de tendência resultam do ajustamento de funções cuja natureza é identificada na legenda da figura sempre que não seja linear. Neste caso, a relação $Ar-Pr$ é potencial (P), sendo o R^2 linear apresentado entre parênteses para permitir comparação.

⁹¹ Tal como já referido para as análises descritas em III.3.2, adoptou-se na interpretação das relações bivariadas o pressuposto de que a variação encontrada nas formas através do espaço pode ser usada como uma representação da sua variação ao longo do tempo (*location-time substitution*) (Piégay e Schumm, 2003; Brooks *et al.*, 2009).

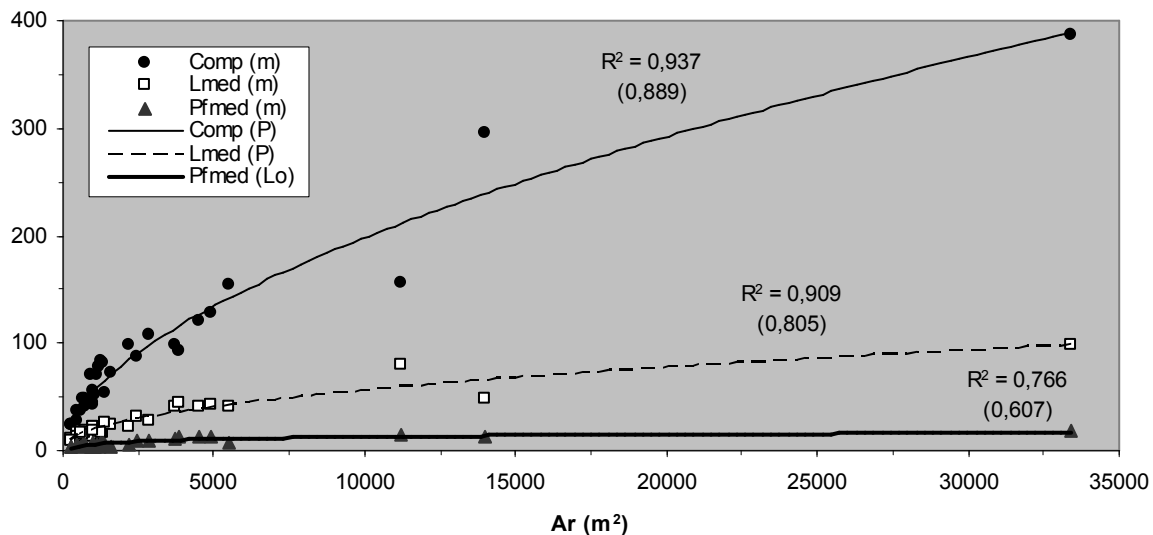


Figura 94 - Relações entre a área (Ar) e o comprimento ($Comp$), a largura média ($Lmed$) e a profundidade média ($Pfmed$) para as 30 formas em análise. A natureza das funções associadas às linhas de tendência é identificada na legenda sempre que não seja linear. Neste caso, as relações $Ar-Comp$ e $Ar-Lmed$ são potenciais (P), e a relação $Ar-Pfmed$ é logarítmica (Lo). Em todos os casos, o R^2 linear é apresentado entre parênteses.

A comparação dos valores de $Comp$, $Lmed$ e $Pfmed$ no mesmo gráfico de dispersão deixa claro o predomínio do aumento do comprimento em relação à largura. A partir do seu ponto de iniciação, o desenvolvimento dos sistemas de ravinas em estudo é assim marcado sobretudo pela regressão das cabeceiras para montante, acompanhada por uma expansão lateral menos dinâmica, e tendo como resultado uma configuração caracteristicamente alongada. A profundidade evolui a taxas ainda menores, implicando um perfil transversal progressivamente mais alargado face à respectiva profundidade. É aqui de salientar a concordância entre este predomínio da expansão para montante e o controlo por parte da área de drenagem sobre o desenvolvimento geral das formas, já descrito em III.3.3.1.

Ao contrário das propriedades até aqui descritas, o volume total (Vol) mostra um aumento ao longo de todos os valores de Ar (Figura 95 (b)). Este padrão indica que as formas de maiores dimensões não sofreram ainda o assoreamento que tem sido postulado na literatura como marcando a fase final de evolução de uma ravina ou sistema de ravinas⁹² (e.g. Ireland *et al.*, 1939; Wells *et al.*, 1991). Tal situação seria indicada por (i) uma diminuição marcada do aumento do volume face a aumentos iguais em área, traduzindo um crescimento areal acompanhado da acumulação nos fundos do material removido das paredes e cabeceiras; e (ii) por uma diminuição da profundidade média com o crescimento, igualmente sinalizando

⁹² Vd. I.5.1.

deposição nos fundos. Os resultados obtidos, ao contrário, são concordantes com a ausência de associação anteriormente encontrada entre as dimensões e o indicador de desenvolvimento adotado⁹³, e reforçam a noção de que, para além da expansão das formas ter sido controlada pelo escoamento proveniente de montante, as formas maiores não estão necessariamente mais próximas da estabilização.

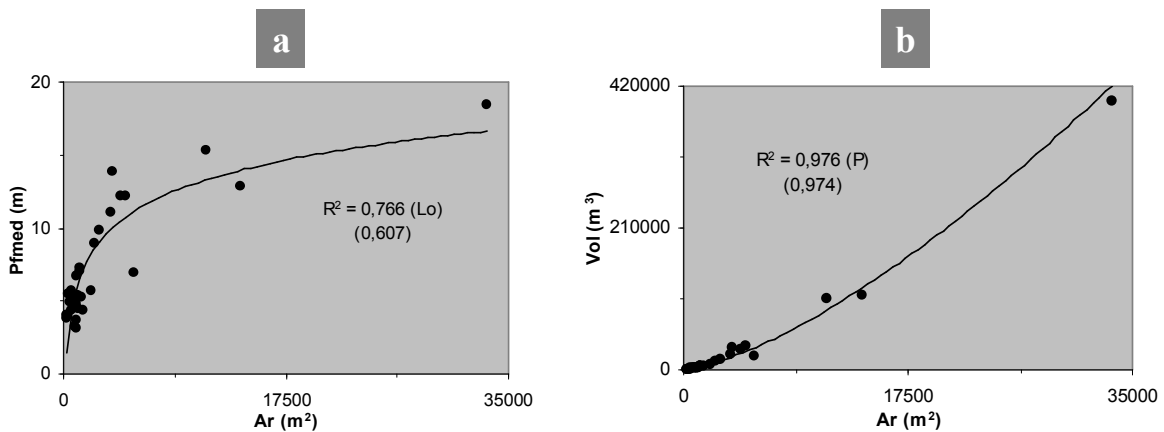


Figura 95 - Relações entre a área (Ar) e a profundidade média ($Pfmed$) (a), e entre Ar e o volume (Vol) (b). A natureza da função ajustada é identificada entre parênteses. (Lo) logarítmica; (P) potencial. O valor entre parênteses é o R^2 linear.

A análise das relações entre $Comp$, $Pfmed$ e $Lmed$ (Figura 96) torna evidente a existência de alguma dispersão nos valores. A este respeito, é importante ter presente que as relações descritas caracterizam as 30 formas em análise de uma maneira geral, não impedindo que se possam verificar relações morfológicas mais ou menos diferenciadas entre sub-conjuntos de complexos de ravinas. Um outro exemplo desta dispersão é apresentado na Figura 97, em que foram representadas as relações entre a largura média e a razão largura média/profundidade média (a), e entre o comprimento e a razão comprimento/largura média (b). Embora ambas as relações sejam estatisticamente significativas e positivas (vd. correlações no Anexo 3), as nuvens de pontos sugerem a existência de sub-conjuntos de unidades de análise marcados por relações distintas.

⁹³ Razão entre a área da forma e a sua área de drenagem medida na desembocadura, ou Ar/A_{dren} (vd. matriz de correlações no Anexo 3).

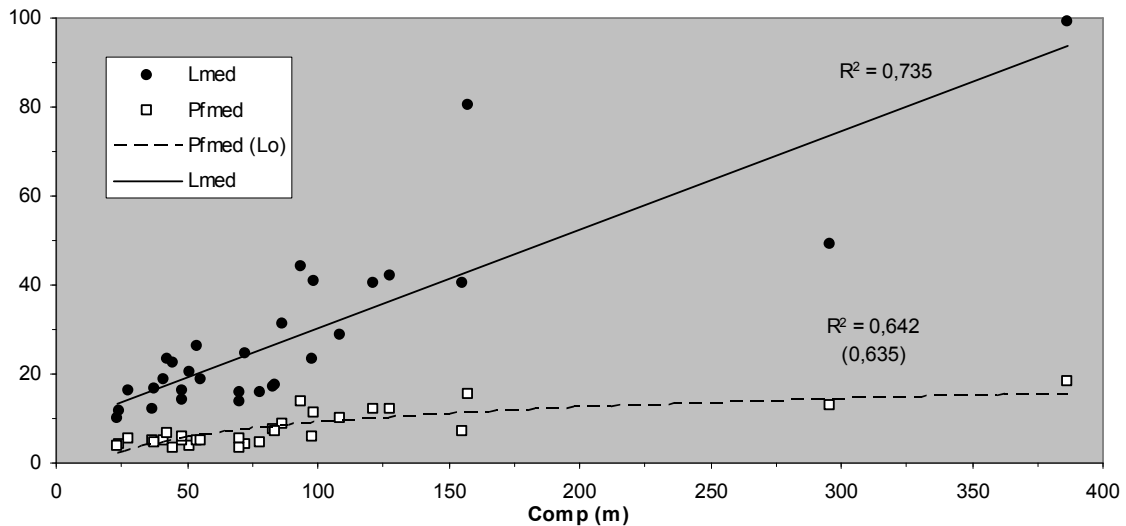


Figura 96 - Relações entre o comprimento (*Comp*), a largura média (*Lmed*) e a profundidade média (*Pfmed*) para as 30 formas em análise. A natureza das funções associadas às linhas de tendência é identificada na legenda sempre que não seja linear, sendo nestes casos o R^2 linear apresentado entre parênteses. Lo - logarítmica.

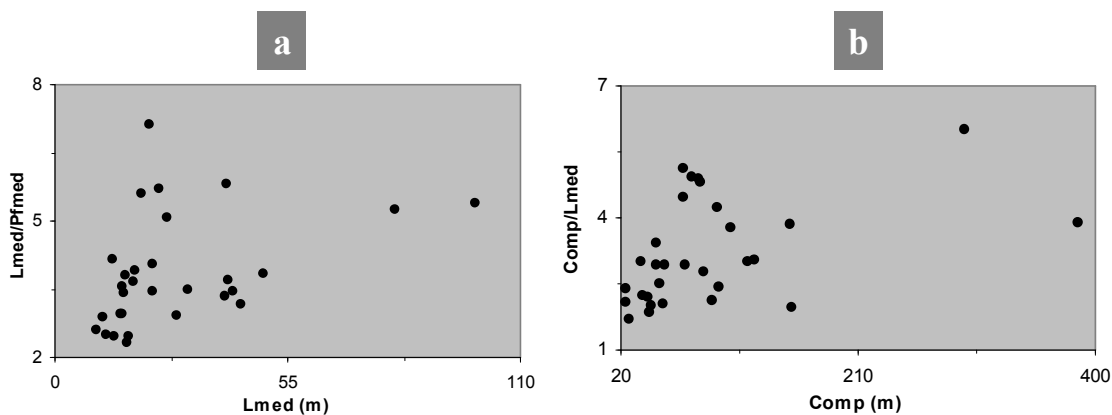


Figura 97 - Relações entre a largura média (*Lmed*) e a razão largura média/profundidade média (*Lmed/Pfmed*) (a), e entre o comprimento (*Comp*) e a razão comprimento/largura média (*Comp/Lmed*) (b).

Considerando de seguida as variáveis relativas a sectores específicos dentro das formas (montante, intermédio, jusante), os valores de correlação obtidos (Anexo 3) mostram relações altamente significativas entre *Ar*, *Pr*, *Pr-Pcirc*, *Comp* e *Vol* e as larguras e profundidades médias associadas a cada sector (i.e. *Lm_mon*, *Lm_int*, *Lm_jus*, *Pfmed_mon*, *Pfmed_int*, *Pfmed_jus*). Particularmente significativo é o facto de as primeiras variáveis, que caracterizam a totalidade da forma, estarem quase invariavelmente menos fortemente correlacionadas com as variáveis sectoriais relativas aos sectores mais afastados da cabeceira. Assim, e a título de

exemplo, *Ar* está mais fortemente correlacionada com *Lm_mon* ($r=0,934$) do que com *Lm_int* ($r=0,853$), e mais com esta do que com *Lm_jus* ($r=0,690$). No que concerne à profundidade, e adoptando agora o perímetro como exemplo, verifica-se que *Pr* está mais correlacionado com *Pf_mon* ($r=0,801$) do que com *Pf_int* ($r=0,737$), e mais com esta do que com *Pf_jus* ($r=0,524$). Este padrão indica que a variação nas dimensões globais das formas é reflectida mais proximamente pelos sectores a montante do que pelos sectores terminais e sugere que, com a evolução, os sectores que vão ficando progressivamente mais distantes das cabeceiras apresentam uma dinâmica cada vez menor, justificando a correlação mais fraca com as dimensões das formas. No que concerne à profundidade, *Pfmax* está mais fortemente correlacionada com *Pf_mon* ($r=0,987$) do que com *Pf_int* ($r=0,964$), e muito mais com esta do que com *Pf_jus* ($r=0,755$), o que mostra que as profundidades maiores são atingidas nos sectores mais a montante à medida que as formas entalham as vertentes.

As relações entre área das formas e as larguras e profundidades sectoriais são apresentadas nas Figuras 98 e 99, e tornam notório que a diferença nos coeficientes de determinação entre os sectores montante e intermédio é menor do que entre os sectores intermédio e jusante, denotando uma importância relativamente elevada dos sectores intermédios no desenvolvimento das formas. Adicionalmente, as figuras permitem constatar que à medida que as formas crescem, as larguras e as profundidades nos sectores intermédios e montante se mantêm relativamente próximas entre si e se distanciam progressivamente dos valores do sector jusante, de acordo com a configuração caracteristicamente larga na cabeceira e estreita na desembocadura apresentada pelos complexos de ravinas (e.g. Figs. 29 (a), 42 (a), 43 (a) e 54)

No que diz respeito aos dois indicadores de declive caracterizados em cada um dos três sectores e adicionalmente na cabeceira (o declive geral *D* e o declive ao longo do fundo *DF*), observaram-se diferentes padrões de correlação. O declive ao longo do fundo (*DF*) está inversamente correlacionado com as variáveis gerais já referidas (*Ar*, *Pr*, *Pr-Pcirc*, *Comp*, *Lmed*, *Vol*), embora os valores dos coeficientes de correlação não permitam definir relações fortes. Ainda assim, a representação num gráfico de dispersão das relações *Ar* e *DF* nos sectores de cabeceira, montante e intermédio (optou-se por deixar o sector jusante de fora por apresentar correlações mais baixas e de modo a não condicionar a legibilidade da figura) torna claro que, à medida que as formas se desenvolvem, os declives ao longo do fundo se tornam tendencialmente mais suaves (Figura 100), com os sectores mais a montante tendendo a apresentar valores mais elevados.

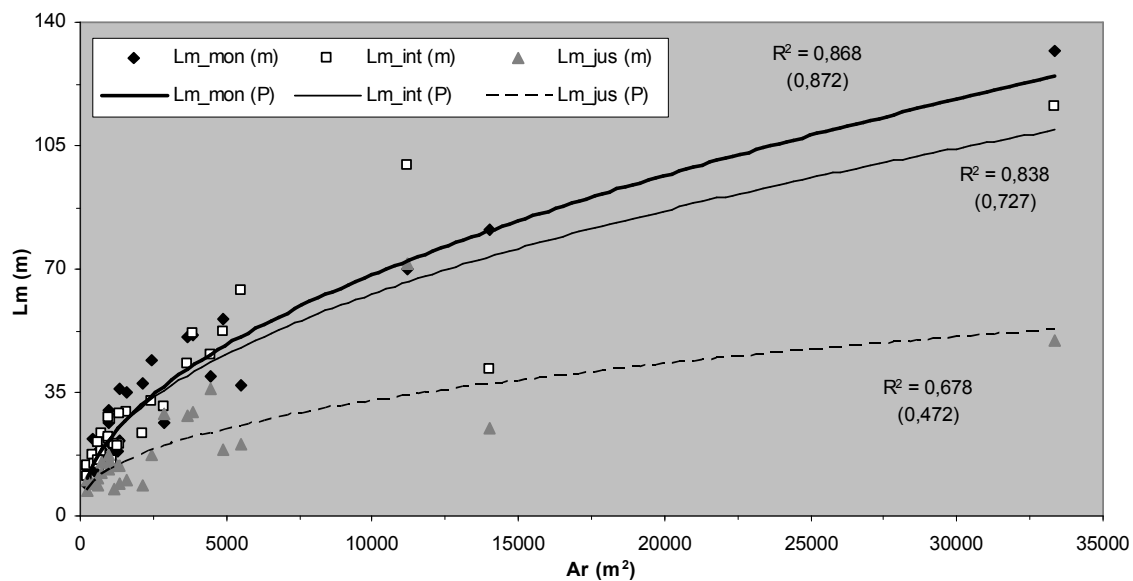


Figura 98 - Relações entre a área (Ar), e a largura média nos três sectores de referência. A natureza das funções associadas às linhas de tendência é identificada na legenda sempre que não seja linear, sendo nestes casos o R^2 linear apresentado entre parênteses. P - Potencial.

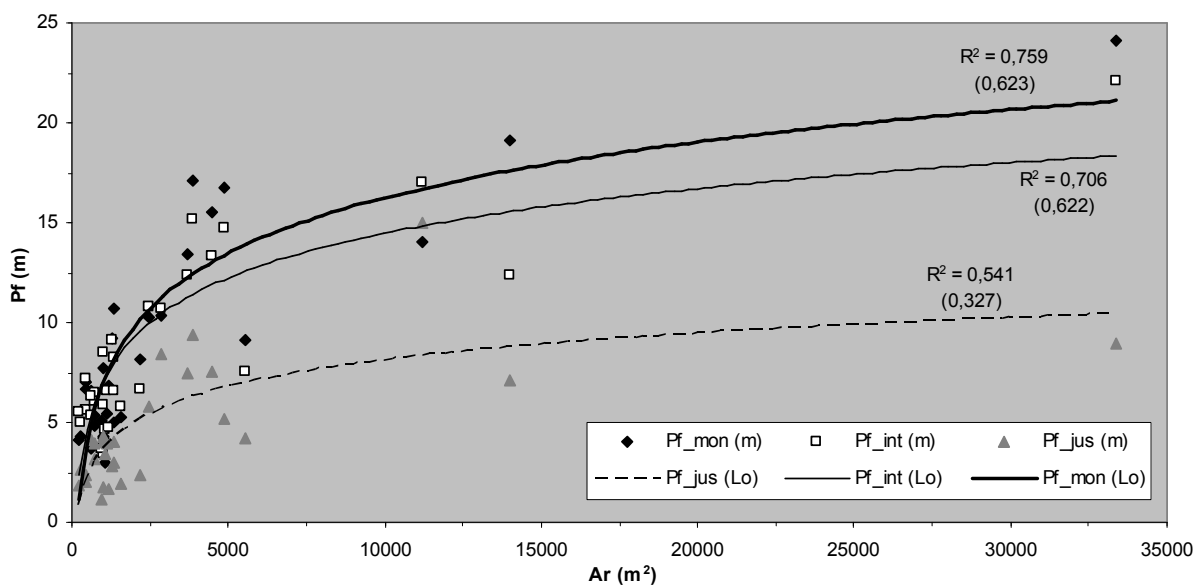


Figura 99 - Relações entre área (Ar), e profundidade média nos três sectores de referência. A natureza das funções associadas às linhas de tendência é identificada na legenda sempre que não seja linear, sendo nestes casos o R^2 linear apresentado entre parênteses. Lo - Logarítmica.

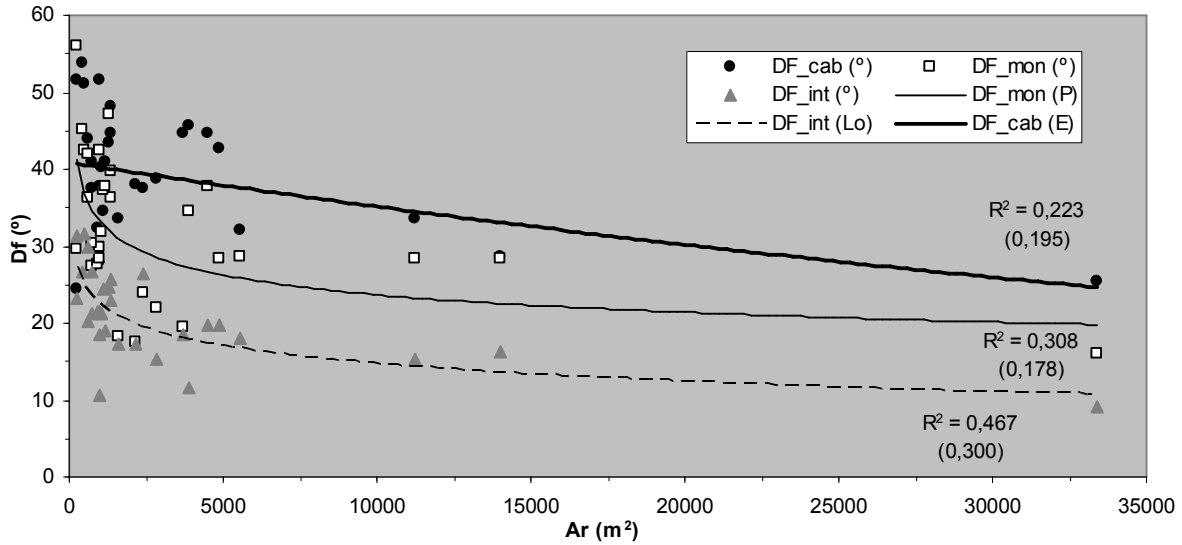


Figura 100 - Relações entre área (Ar) e declive no fundo (DF) nos três sectores de referência. A natureza das funções associadas às linhas de tendência é identificada na legenda sempre que não seja linear, sendo nestes casos o R^2 linear apresentado entre parênteses. Lo - Logarítmica; P - Potencial; E - Exponencial.

Ao contrário do que ocorre com DF , não foi possível encontrar correlações entre as variáveis gerais (i.e. referentes à totalidade da forma, por oposição a sectoriais) já referidas e D (o declive considerado em relação a um sector de referência), mostrando que, de acordo com a morfologia actualmente apresentada pelos sistemas de ravinas em estudo, não é possível encontrar a associação entre crescimento e diminuição da inclinação das paredes e cabeceiras que seria expectável de formas em estabilização (uma vez mais, tendo como referência os ciclos de desenvolvimento propostos por Ireland *et al.*, 1939 e Wells *et al.*, 1991). No entanto, os coeficientes de correlação mostram que, para cada sector, há uma associação positiva significativa entre o declive geral e o declive no fundo (Figura 101), o que implica que as formas com perfis longitudinais mais suaves (i.e. menores DF) tendem geralmente a apresentar paredes menos declivosas (i.e. menores D). Esta relação é confirmada pelas correlações negativas significativas entre D e DF em todos os sectores e $Lmed/Pfmed$ (Anexo 3).

É ainda importante referir que, salvo casos pontuais, não foram encontradas associações entre as variáveis gerais e os índices morfológicos que se pretendeu aplicar. Este foi o caso de Lm_mon/Lm_jus , $Lmed/Pfmed$ e $Iconc$.

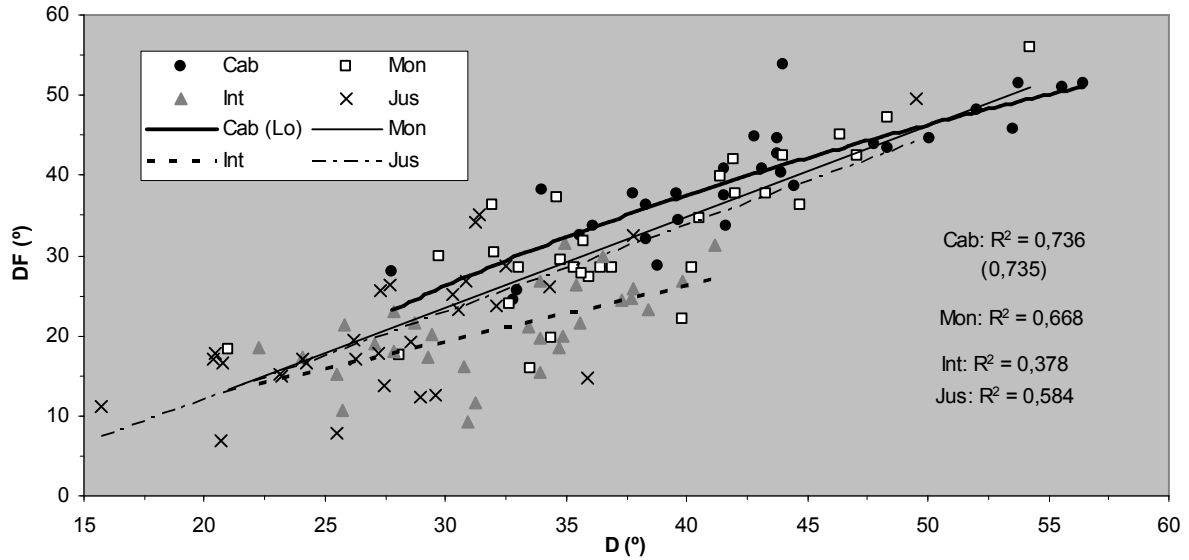


Figura 101 - Relações entre declive (D) e declive no fundo (DF) nos três sectores de referência. A natureza das funções associadas às linhas de tendência é identificada na legenda sempre que não seja linear, sendo nestes casos o R^2 linear apresentado entre parênteses. Lo - Logarítmica.

Finalmente, o indicador de desenvolvimento utilizado (razão entre a área da forma e a área de drenagem medida na desembocadura, ou Ar/Ad_{des}) apresentou correlações positivas significativas com $Lmed/Pfmed$, $Lmed/Pfmed_{mon}$, e $Lmed/Pfmed_{int}$ (Figura 102) e, ao mesmo tempo, correlações negativas significativas face a D_{int} , D_{jus} , e DF_{jus} . Estes resultados, embora baseados em valores de correlação muito baixos, sugerem que o perfil transversal se tende a tornar mais suave à medida que a área de drenagem disponível para produzir escoamento se reduz, tendência que já tinha sido definida com relação à dimensão em resultado da evolução conjunta da profundidade e da largura face à área (Figura 94).

Em paralelo com a diminuição dos declives (D) nos sectores intermédio e jusante, a diminuição do declive específico do fundo no sector jusante (DF_{jus}) com o aumento de Ar/Ad_{des} parece sugerir assoreamento com material proveniente de montante à medida que as formas se desenvolvem (Figura 103). Porém, as elevadas dispersões obtidas e os baixos coeficientes de correlação não permitem assumir correspondência entre o suposto grau de evolução descrito por Ar/Ad_{des} e padrões morfológicos claros.

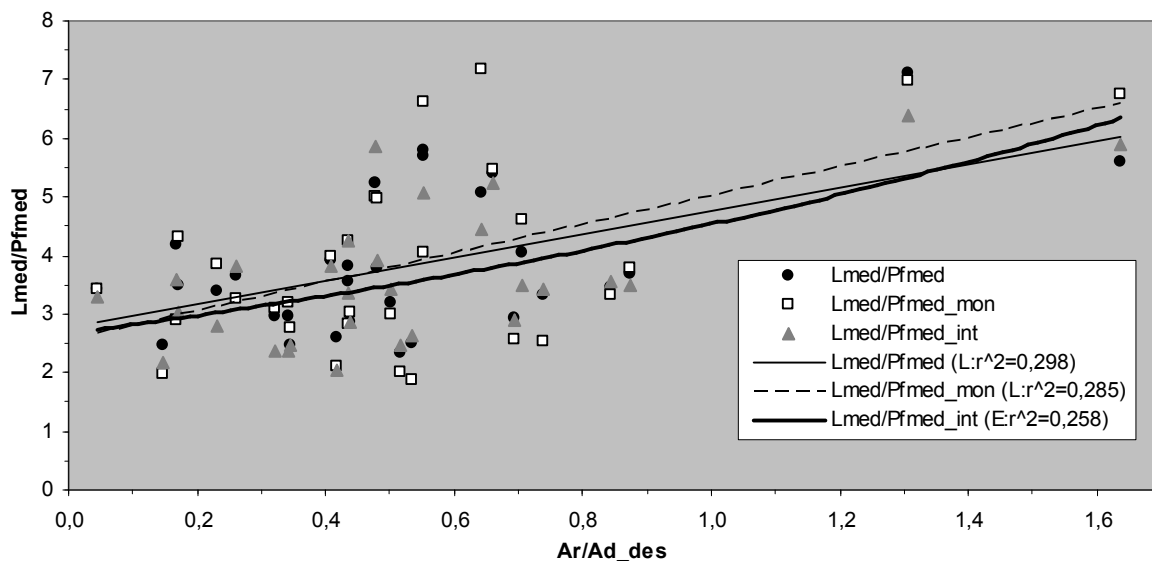


Figura 102 - Relações entre grau de desenvolvimento (Ar/Ad_{des}) e a razão largura média-profundidade média (L_{med}/P_{fmed}), tanto para a totalidade das formas como especificamente para os sectores montante (L_{med}/P_{fmed}_{mon}) e intermédios (L_{med}/P_{fmed}_{int}). Os valores na legenda referentes às linhas de tendência indicam a natureza da relação (L - linear; E - exponencial) e o coeficiente de determinação (representado como r^2).

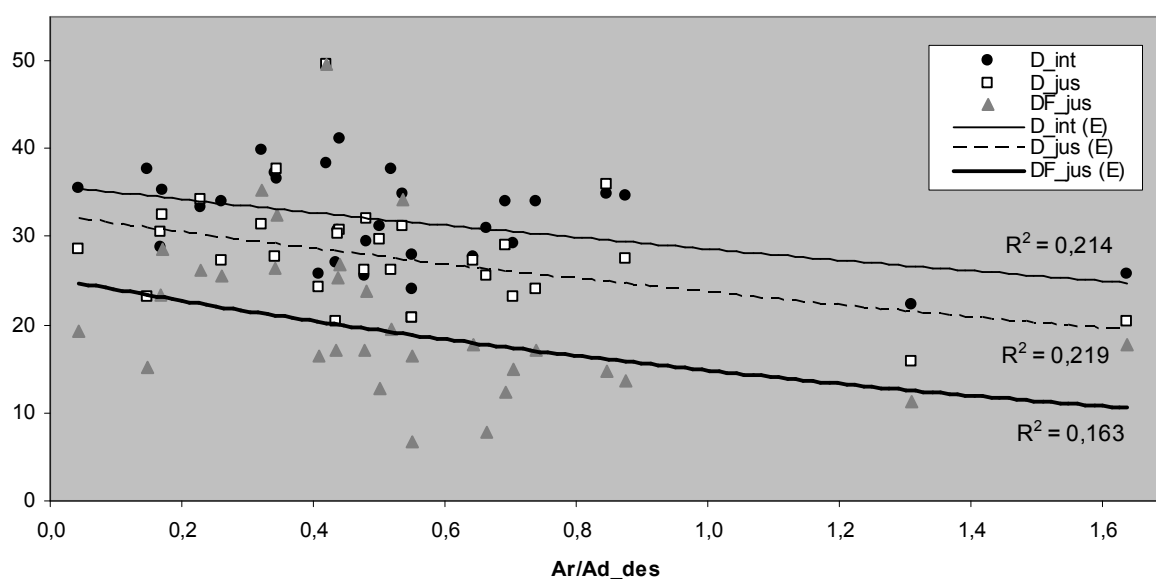


Figura 103 - Relações entre grau de desenvolvimento (Ar/Ad_{des}), declive nos sectores intermédio e jusante (D_{int} ; D_{jus}) e o declive no fundo no sector jusante (DF_{jus}). A natureza das relações (E - exponencial) é apresentada na legenda, e os coeficientes de determinação (R^2) são mostrados juntamente com as linhas de tendência na área do gráfico.

A análise das correlações obtidas permitiu conceptualizar um padrão de desenvolvimento morfológico generalizado para os sistemas de ravinas em estudo. Este padrão é marcado por uma regressão e bifurcação das cabeceiras (levando ao aumento do comprimento e da sinuosidade do perímetro), que predomina sobre o alargamento, levando a uma forma alongada. Ao longo da forma, o sector mais a montante sofre alargamento e aprofundamento máximos, com ambos a diminuir na direcção da desembocadura. O alongamento e alargamento das formas são acompanhados por um aprofundamento progressivo, mas a taxas bastante menores, pelo que as formas têm desde uma fase relativamente inicial⁹⁴ um perfil transversal mais largo do que profundo.

Ao longo do tempo, o crescimento é marcado pela diminuição das taxas de aprofundamento e alargamento, com o comprimento aumentando ainda a uma taxa relativamente elevada (Figura 94).

A menor dinâmica da taxa de aprofundamento face à regressão das cabeceiras faz com que os perfis longitudinais das formas tendam a diminuir de declive com o desenvolvimento, mantendo os valores mais elevados nos sectores mais a montante.

Ao contrário do que tem sido assumido na literatura com relação à evolução de ravinas a longo prazo, o volume das formas aumenta continuamente desde a sua iniciação, o que exclui a hipótese de estas estarem presentemente numa fase de suavização e assoreamento significativo. O mesmo é sugerido pela não ocorrência de diminuição da profundidade média, embora, conforme observado no campo, todas as formas se apresentem fracamente conectadas com a rede de drenagem (e portanto sem a acção regular de fluxos capazes de remover o material proveniente das paredes e cabeceiras).

Embora, como foi já observado através de regressão linear múltipla, a área de drenagem exerça o controlo fundamental sobre o crescimento dos sistemas de ravinas em estudo (vd. III.3.3.1), não foi possível associar uma evolução morfológica clara à progressiva expansão destas formas nas respectivas áreas de drenagem (i.e. ao aumento de Ar/Ad_{des}).

Apesar de assentes em relações estatísticas significativas, os padrões de desenvolvimento descritos são bastante generalizados, sendo frequentemente caracterizados por uma elevada dispersão dos valores face às linhas de tendência das funções ajustadas. Esta dispersão sugere a existência de contextos de formação e evolução diferenciados entre as formas em análise ou,

⁹⁴ É de salientar que as formas de menores dimensões encontradas possuem já dimensões métricas. Dado que não foram observadas formas numa fase verdadeiramente incipiente, adoptou-se a expressão "relativamente inicial".

adoptando o enquadramento conceptual proposto (vd.I.6), a existência de grupos de formas associados a combinações específicas de morfologia, processos e factores.

Após a análise das características e relações que acima se descreveu, procurou-se resumir a informação presente nos 30 indicadores morfológicos recorrendo a Análise em Componentes Principais. As Componentes resultantes serviram depois de *input* a todas as análises subsequentes, relacionando morfologia com processos e respectivas (potenciais) variáveis de controlo. Embora necessariamente mais detalhada, a utilização dos 30 indicadores morfológicos em simultâneo iria dificultar grandemente a interpretação dos resultados das análises, introduzindo ao mesmo tempo redundância (conforme se pode inferir pelas numerosas correlações lineares fortes já observadas).

4.1.8.2. Análise de componentes principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica de análise exploratória multivariada que permite resumir a informação existente num conjunto de variáveis correlacionadas num novo conjunto menor de combinações lineares destas variáveis, independentes entre si, e designadas *componentes principais* (Maroco, 2007: 329). A extracção das componentes principais reduz a complexidade existente num dado conjunto de dados, facilitando a sua interpretação.

Formalmente, o objectivo da ACP é, com base em p variáveis originais correlacionadas, formar p combinações lineares independentes (op.cit: 332):

$$\xi_1 = \gamma_{11} \cdot X_1 + \gamma_{12} \cdot X_2 + \dots + \gamma_{1p} \cdot X_p$$

$$\xi_2 = \gamma_{21} \cdot X_1 + \gamma_{22} \cdot X_2 + \dots + \gamma_{2p} \cdot X_p$$

...

$$\xi_p = \gamma_{p1} \cdot X_1 + \gamma_{p2} \cdot X_2 + \dots + \gamma_{pp} \cdot X_p$$

sendo X_1, X_2, \dots, X_p as p variáveis originais, $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p$ as p componentes principais, e γ_{ij} o "peso" da variável j na componente principal i . A definição dos pesos é sujeita a três constrangimentos:

- 1) A primeira componente explica a maior proporção da variância total das variáveis originais;
- 2) A componente seguinte explica a maior proporção da variância não explicada pela primeira, sendo independente dela;
- 3) A escala das novas componentes é fixa, de modo a manter constante a variância total.

Este método apresenta a vantagem de não pressupor normalidade por parte das variáveis em análise e permite, adicionalmente, a utilização das componentes definidas em análises que

exigem que as variáveis de entrada não estejam intercorrelacionadas (e.g. regressão linear múltipla) (op.cit.: 337). Ao mesmo tempo, porém, é importante não deixar de considerar uma limitação: o facto de as variáveis em cada componente principal estarem linearmente correlacionadas entre si implica que é ignorada a natureza não-linear das relações que se verificou caracterizarem numerosos pares das variáveis em estudo (vd. III.3.2.1), sendo a força real destas relações subestimada.

Utilizando o SPSS 15.0⁹⁵, foi corrida uma primeira análise com o fim de definir o número mais adequado de componentes a extrair. Definiram-se, de forma exploratória, 15 componentes, sendo a proporção da variância explicada por cada uma apresentada na Tabela 86. A Tabela é complementada pela representação gráfica dos valores próprios por componente na Figura 104.

Tabela 86 - Proporção da variância explicada por cada uma das 15 componentes principais (CP) definidas numa análise preliminar. Os Valores próprios ou *Eigenvalues* identificam o número de variáveis originais cuja variância é explicada por cada CP. % - Percentagem de variância total explicada por factor; % *cum* - percentagem de variância total acumulada.

CP	Valores próprios (<i>eigenvalues</i>)	%	% cum
1	12,926	43,085	43,085
2	6,101	20,336	63,422
3	2,714	9,047	72,468
4	1,815	6,051	78,519
5	1,526	5,087	83,606
6	1,308	4,359	87,965
7	0,730	2,433	90,399
8	0,636	2,121	92,520
9	0,601	2,004	94,524
10	0,349	1,162	95,686
11	0,284	0,948	96,634
12	0,231	0,770	97,404
13	0,180	0,600	98,004
14	0,138	0,459	98,463
15	0,105	0,350	98,813
Total	29,644	98,813	

⁹⁵ Ferramenta *Categorical Principal Components*. Embora, como a designação indica, a ferramenta tenha sido especialmente desenvolvida para integrar variáveis de escala de análise ordinal e nominal, a definição de todas as variáveis como numéricas torna a análise numa Análise de Componentes Principais simples (Maroco, 2007: 338).

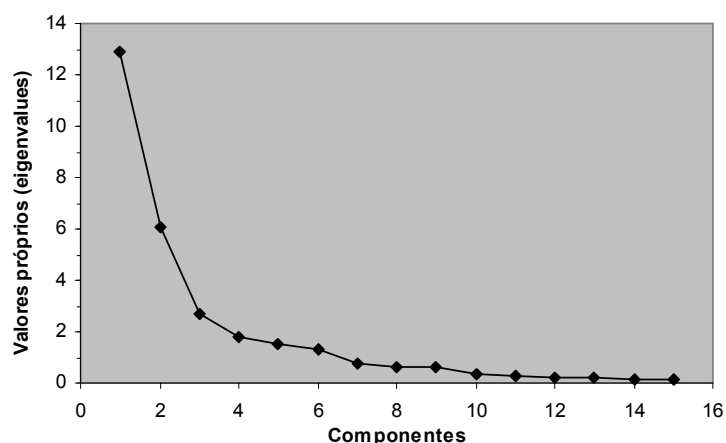


Figura 104 - Distribuição dos valores próprios (i.e. *Eigenvalues*) por componente principal, para um conjunto inicial de 15 componentes.

A análise da Tabela mostra que, a partir da 7ª CP, cada Componente explica uma parte da variância total inferior a cada uma das variáveis originais (valor próprio < 1). O mesmo pode ser observado na Figura 104.

Com base nestes resultados, optou-se por correr uma análise definitiva adoptando seis Componentes Principais e assim explicando 87,97% da variância do conjunto original de 30 variáveis. Os resultados são apresentados nas Tabelas 87 e 88, respectivamente com os coeficientes de correlação entre cada variável e cada CP (i.e. os *component loadings*), e os *scores* de cada uma das 30 unidades de análise nas seis Componentes construídas.

A análise dos *loadings* permitiu conjugar as associações entre diferentes variáveis e cada uma das componentes definidas, com vista à interpretação destas últimas.

A **componente 1** explica por si 43% da variância total e, correspondentemente, é a que apresenta relações mais fortes com maior número de variáveis. Correlaciona-se positivamente com todas as dimensões (área, perímetro, profundidade, largura, comprimento, volume), e com a sinuosidade (*Pr-Pcirc*, em m). Relaciona-se inversamente com os declives no fundo, pelo que pode ser assumida como representando simultaneamente a dimensão e a suavização do perfil longitudinal.

A **componente 2** explica 20,34% da variância total e correlaciona-se positivamente com a razão largura/profundidade, tanto para a generalidade das formas (*Lmed/Pfmed*) como para sectores particulares, e negativamente com os declives nos mesmos sectores, bem como na cabeceira (onde também se relaciona de forma inversa com o declive no fundo *Df_cab*). Também se correlaciona negativamente, embora com menos força, com a profundidade máxima e média, esta última tanto em termos gerais como em todos os sectores. Foi

interpretada como representando a suavização do perfil transversal das formas e a superficialidade do entalhe.

Tabela 87 - Coeficientes de correlação linear (*loadings*) entre as 30 variáveis de entrada e as seis componentes principais definidas. Valores acima de 0,500 foram evidenciados de forma a facilitar a análise.

Variáveis	Componentes principais					
	1	2	3	4	5	6
Ar (m ²)	0,925	-0,119	0,201	-0,006	0,103	-0,122
Pr (m)	0,879	-0,126	0,293	0,201	0,016	-0,094
Ar/Ad_des	0,356	0,349	-0,448	0,163	0,108	-0,073
Pr-Pcirc (m)	0,771	-0,050	0,380	0,331	-0,146	-0,115
Comp (m)	0,888	-0,130	0,272	0,264	-0,041	-0,129
Lm_mon (m)	0,906	-0,085	-0,016	0,043	0,294	-0,092
Lm_int (m)	0,919	-0,071	-0,225	-0,075	-0,017	-0,173
Lm_jus (m)	0,859	-0,160	-0,145	-0,353	-0,182	-0,024
Lm_mon/Lm_jus	0,284	0,081	-0,014	0,660	0,606	0,101
Lmed (m)	0,958	-0,140	-0,126	-0,033	0,072	-0,092
Comp/Lmed	0,148	0,009	0,722	0,469	-0,292	-0,010
Vol (m ³)	0,930	-0,138	0,147	-0,090	0,111	-0,116
Pfmax (m)	0,843	-0,481	0,054	-0,043	0,007	0,037
Pfmed (m)	0,837	-0,478	-0,159	-0,091	-0,038	0,102
Pfmon (m)	0,839	-0,443	0,040	0,110	-0,047	-0,005
Pfint (m)	0,805	-0,481	-0,139	-0,206	-0,018	0,094
Pfjus (m)	0,699	-0,431	-0,286	-0,347	-0,048	0,121
Lmed/ Pfmed	0,448	0,790	-0,204	0,012	0,033	-0,240
Lmed/ Pfmed_mon	0,291	0,730	-0,296	-0,020	0,439	-0,134
Lmed/ Pfmed_int	0,492	0,733	-0,337	0,023	-0,056	-0,169
Lmed/ Pfmed_jus	0,031	0,587	0,286	-0,162	-0,421	-0,228
D_cab (°)	-0,248	-0,673	-0,528	0,167	-0,089	-0,215
D_mon (°)	-0,218	-0,724	-0,262	0,343	-0,272	-0,267
D_int (°)	-0,319	-0,815	0,166	-0,084	0,007	-0,009
D_jus (°)	-0,293	-0,570	0,361	-0,362	0,415	-0,040
DF_cab (°)	-0,406	-0,574	-0,558	0,251	-0,006	-0,003
DF_mon (°)	-0,614	-0,384	-0,282	0,266	-0,136	-0,260
DF_int (°)	-0,684	-0,380	0,069	0,086	0,271	-0,380
DF_jus (°)	-0,587	-0,379	0,398	-0,216	0,404	-0,109
Iconc	0,261	-0,042	-0,153	0,299	-0,019	0,803

A **componente 3** corresponde a 9,05% da variância total. Correlaciona-se positivamente com a razão comprimento/largura média e negativamente com os declives (geral e de fundo) na cabeceira. Está ainda negativamente correlacionada, embora com menor intensidade, com a razão *Ar/Ad_des*. Em termos gerais, considerou-se que caracteriza o grau de alongamento de cada forma e de suavização da respectiva cabeceira, e o potencial da área de drenagem para produzir escoamento.

A **componente 4** tem associados apenas 6,05% da variância total. Correlaciona-se positivamente com a razão entre as larguras nos sectores montante e jusante (Lm_mon/Lm_jus) e, em menor grau, com a razão comprimento/largura. Pode assumir-se que descreve essencialmente a dinâmica de expansão centrada nas áreas mais próximas da cabeceira.

Tabela 88 - Valores (*scores*) associados a cada um dos 30 sistemas de ravinas nas seis Componentes Principais definidas.

Formas	Componentes principais					
	1	2	3	4	5	6
1	-1,021	-0,801	-0,303	0,425	0,725	0,083
2	-0,560	-1,099	0,002	1,849	-0,625	0,385
3	0,066	1,992	-0,154	0,722	1,121	0,834
4	-1,111	-1,067	-0,952	0,582	0,641	-0,830
5	0,773	-1,003	-0,662	-0,472	-1,693	0,185
6	-0,472	1,664	-1,306	-0,020	0,124	-1,425
7	0,375	-0,451	-0,102	-0,843	-1,387	0,425
8	1,967	-0,076	-1,045	-2,039	-0,322	-0,750
9	-0,590	-0,241	1,272	0,110	-0,193	0,406
10	0,841	-0,404	-0,896	-0,695	0,409	0,980
11	-0,669	0,091	0,184	-1,325	-0,179	-0,316
12	0,176	0,872	0,557	1,533	1,138	1,752
13	-0,181	2,736	-0,875	-0,158	-0,377	-0,450
14	-0,588	1,060	2,152	-0,725	-1,436	-1,499
15	0,846	-0,942	-0,175	0,623	1,087	-0,088
16	-0,522	-1,001	-1,198	0,026	-0,405	-0,144
17	-0,784	0,095	0,872	-1,102	0,394	-0,296
18	0,954	-1,049	-1,559	-0,274	-0,668	1,919
19	-0,339	0,574	-1,829	0,441	1,160	-1,328
20	0,186	-0,591	0,331	-0,915	1,774	0,348
21	-1,104	-0,953	-0,190	0,136	-0,200	-1,769
22	-1,062	-1,060	0,275	-0,191	1,049	-0,976
23	-0,380	0,688	0,110	1,979	-1,121	0,343
24	-0,557	-0,832	0,623	1,028	-1,986	-0,217
25	-0,608	0,497	-0,117	-0,510	1,352	1,114
26	1,131	0,976	0,278	1,281	-1,062	-0,213
27	1,932	-0,783	2,048	1,254	1,182	-0,400
28	-1,209	0,027	1,936	-1,904	0,377	1,243
29	-0,356	0,845	-0,207	-0,660	-1,183	2,039
30	2,868	0,235	0,932	-0,158	0,304	-1,354

A **componente 5**, tal como a componente 4, mostra a correlação mais forte com a razão Lm_mon/Lm_jus . Apresenta correlação positiva com $Lmed/Pfmed_mon$, e negativa com $Lmed/Pfmed_jus$. Finalmente, relaciona-se de forma positiva com D_jus e DF_jus . Considerou-se que pode ser interpretada como exprimindo a dinâmica de expansão lateral nos sectores da forma mais a montante (tal como a componente 4) mas em associação a um sector jusante relativamente entalhado e declivoso. Explica apenas 5,09% da variância total.

Finalmente, a **componente 6** apresenta uma forte correlação positiva exclusivamente com o Índice de Concavidade (*Iconc*), sendo uma medida clara da concavidade longitudinal das formas. É responsável por 4,36% da variância total.

4.2. Processos

Após a análise morfológica acima descrita, procurou-se conhecer os processos geomorfológicos que presentemente controlam a evolução dos 30 sistemas de ravinas em estudo. Numa fase subsequente, pretendeu-se aferir até que ponto formas com morfologias distintas tendem a mostrar processos distintos, articulando-se estas duas componentes do ravinamento tal como já ilustrado na Figura 86.

A revisão bibliográfica levada a cabo no Capítulo I permitiu identificar um conjunto de processos evolutivos tipicamente associados ao ravinamento. Com base nestes, definiu-se um conjunto de variáveis a fim de caracterizar cada sistema de ravinas quanto à natureza dos processos que presentemente assistem à sua evolução e também ao dinamismo que estes apresentam. Estas variáveis processuais foram integradas numa ficha de campo, usada para caracterizar cada um dos sistemas de ravinas no terreno. Todas constituem indicadores da ocorrência de erosão por parte do escoamento (vegetação, dinâmica no fundo) e/ou de movimentos de massa (fracturas de tensão, vegetação, dinâmica nas paredes, fracturas de dessecação, *fluting*).

O sistema de classificação usado é apresentado na Tabela 89.

É importante referir que, de acordo com a revisão realizada, outros indicadores poderiam ser adoptados, designadamente a ocorrência de sapas basais nas paredes/cabeceira, de *plunge-pools* na cabeceira, ou de *piping* (cf. I.4.2). De igual forma, classificações menos generalizadas poderiam ter sido adoptadas, por exemplo levando em conta classes de dimensão para as fracturas de tensão ou a natureza da vegetação presente (i.e. herbácea ou arbustiva). Porém, as observações de campo ao longo de sistemas de ravinas sucessivos permitiram seleccionar estas variáveis e classes como as que caracterizam a realidade existente, ficando implícito que outros possíveis processos e classes não considerados não ocorrem, ou fazem-no de forma excepcional.

Tabela 89 - Variáveis e classes adoptadas na caracterização das formas quanto aos processos.

Variável	Classes
Fracturas de tensão ao longo do perímetro	1. Inexistentes ou pontuais 2. Sistemáticas
Vegetação na cabeceira	1. Inexistente ou pontual. Quase totalidade da cabeceira exposta. Actividade elevada. 2. Cabeceira apresenta vegetação de forma sistemática, mas com o sector de topo ou áreas descontínuas descobertas. Actividade reduzida 3. Cabeceira totalmente coberta por vegetação. Actividade mínima ou nula.
Vegetação nas paredes	1. Inexistente ou pontual. Quase totalidade da parede exposta. Actividade elevada 2. Vegetação ocorre nas paredes de forma sistemática, mas com distribuição ou muito dispersa, ou contínua mas muito pouco densa. Actividade reduzida 3. Paredes dominadas por vegetação densa de forma homogénea, seja com distribuição contínua ou descontínua. Actividade mínima ou nula.
Vegetação no fundo (corpo e desembocaduras das formas considerados separadamente)	1. Inexistente ou pontual. Quase totalidade da área exposta. Actividade elevada. 2. Vegetação ocorre de forma sistemática, mas com distribuição ou muito dispersa, ou contínua mas muito pouco densa. A maioria da área está exposta. Actividade reduzida 3. Espaço dominado por vegetação densa de forma homogénea, seja com distribuição contínua ou descontínua. Actividade mínima ou nula.
Dinâmica nas paredes/cabeceira (consideradas separadamente)	1. Paredes/Cabeceira com acumulações de material erodido de declive relativamente suave apenas na base (<1/3 da parede). Actividade elevada. 2. Paredes/Cabeceira com sector basal relativamente suave, constituído por depósitos e ocupando entre 1/3 e 2/3 da sua altura. Actividade reduzida. 3. Paredes/Cabeceira dominadas por depósitos com declives relativamente suaves e ocupando mais de 2/3 da sua altura. Actividade mínima ou nula.
Dinâmica no fundo	1. Canais bem marcados distribuídos de forma sistemática, drenando o material e o escoamento provenientes das paredes. Actividade elevada 2. Fundo apresenta alguns canais bem marcados mas de forma dispersa, por entre material sem drenagem definida. Actividade reduzida 3. Depósitos sem drenagem bem definida. Canais bem marcados ocorrem de forma pontual ou não ocorrem de todo. Actividade mínima ou nula.
Fluting	1. Inexistente ou pontual. 2. Sistemático. Flutes de largura centimétrica 3. Sistemático. Flutes de largura decimétrica.
Fragmentação por dessecação (paredes/cabeceira)	1. Inexistente ou pontual. 2. Sistemática.

Um caso especial que merece referência é o da dinâmica no fundo. Pretendeu-se inicialmente caracterizar os fundos das formas quanto à presença mais ou menos sistemática de redes de canais bem definidas, indicadora de uma remoção eficiente do material proveniente das cabeceiras. No extremo oposto, um fundo sem drenagem definida indicaria enchimento e estabilização. A observação de campo mostrou, porém, que a quase totalidade das formas apresenta fundos completamente dominados por vegetação extremamente densa (Figura 105), não só impossibilitando a circulação como impedindo a própria observação da superfície topográfica. Foi, ainda assim, possível analisar parte dos fundos de numerosos sistemas de ravinas, mostrando que todos apresentam canais incipientes e descontínuos, ou inexistentes.

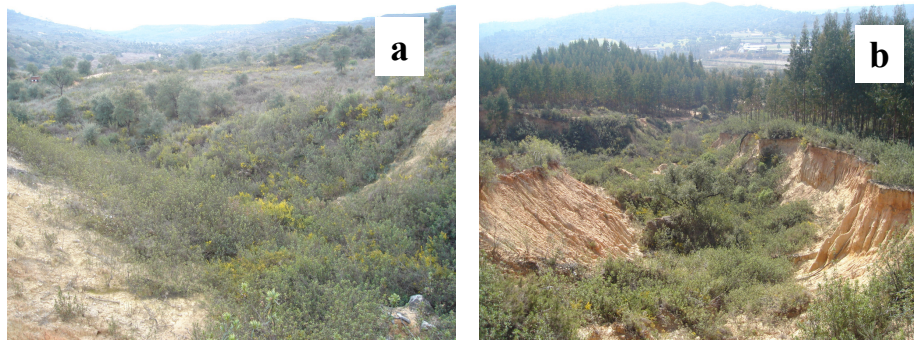


Figura 105 - Dois exemplos de fundos dominados por vegetação: formas F29 (a) e F26 (b). Fotografias tiradas desde as cabeceiras.

De forma complementar, o levantamento dGPS realizado permitiu observar as 30 secções de desembocadura, revelando que todas as formas se encontram fundamentalmente desconectadas da rede de drenagem das duas bacias, ou seja, não possuem canais de ligação à rede exterior, ou possuem apenas canais incipientes (e.g. Figura 43). Assumiu-se assim a estabilização dos fundos para a totalidade das formas, opção apoiada pela própria densidade da vegetação observável, em si um indicador dessa mesma estabilização.

Os resultados da caracterização realizada são apresentados na Tabela 90, sendo o número de unidades de análise associado a cada classe explicitado na Tabela 91. As percentagens do total de formas associadas a cada classe e cada variável são apresentadas na Figura 106.

No que diz respeito à distribuição da vegetação, a Figura 106 (a) torna claro que, tal como foi já dito, a quase totalidade das formas apresenta os fundos colonizados por uma camada densa de vegetação, contínua ou descontínua, e estendendo-se desde a base da cabeceira até à desembocadura. O padrão torna-se mais heterogéneo quando se considera a vegetação na cabeceira e nas paredes (Figura 106 (c)). No que concerne à cabeceira, c. 57% das formas apresentam a superfície quase toda exposta (classe 1), e 37% apresentam o topo ou áreas descontínuas expostas (classe 2). Apenas uma pequena minoria das formas possui a cabeceira totalmente coberta (classe 3). No caso das paredes, a maioria das formas (50%) apresenta uma cobertura por vegetação que é muito dispersa, ou contínua mas muito pouco densa (classe 2, e.g. cobertura por plantas de *Cistus ladanifer* de pequenas dimensões). O restante das formas distribui-se de forma mais ou menos equivalente pela classe 1 (vegetação inexistente ou pontual) e 3 (paredes dominadas por vegetação densa de forma homogénea).

Tabela 90 - Resultados da caracterização das formas quanto aos processos. *Frc_p* - Fracturas de tensão no perímetro; *Vgf_co* e *Vgf_d* - vegetação no fundo, respectivamente no corpo e desembocadura das formas; *Frg_dess* - fragmentação por dessecação; *Vg_p* - vegetação nas paredes; *Vg_c* - vegetação na cabeceira; *Din_p* - dinâmica nas paredes; *Din_c* - dinâmica na cabeceira; *Flt* - fluting.

Forma	Frc_p (1-2)	Vgf (1-3)		Frg_dess (1-2)	Vg_p (1-3)	Vg_c (1-3)	Din_p (1-3)	Din_c (1-3)	Flt (1-3)
		Vgf_co	Vgf_d						
F01	1	3	3	1	1	1	1	2	1
F02	1	1	3	1	1	1	1	1	1
F03	1	3	3	2	2	2	3	3	1
F04	1	3	3	1	1	1	1	1	3
F05	1	3	3	2	2	1	2	1	3
F06	1	3	3	1	2	1	3	2	1
F07	1	3	3	1	2	1	2	2	3
F08	1	3	3	2	2	1	2	2	3
F09	2	3	3	2	2	2	2	2	2
F10	1	3	3	2	2	1	2	1	3
F11	1	3	3	1	2	2	3	2	1
F12	1	3	3	2	3	2	3	3	1
F13	1	3	3	2	3	2	3	3	1
F14	2	3	3	2	3	3	3	3	1
F15	1	3	3	2	2	1	2	1	3
F16	1	3	3	1	3	1	3	2	1
F17	1	3	3	1	3	3	3	3	1
F18	1	3	2	1	2	1	2	1	1
F19	1	3	3	1	3	2	2	3	1
F20	1	3	3	1	3	2	3	3	1
F21	1	3	3	1	1	1	1	1	1
F22	1	3	3	1	1	1	2	2	1
F23	1	3	3	1	2	2	2	3	1
F24	1	3	3	1	1	1	2	2	1
F25	1	3	3	2	2	2	2	2	1
F26	2	3	3	2	2	1	2	1	2
F27	1	3	3	1	2	1	2	1	3
F28	1	3	3	1	1	1	1	2	1
F29	2	3	3	2	3	2	3	3	1
F30	1	3	3	1	2	2	2	3	1

Tabela 91 - Número de sistemas de ravinas por classe de cada variável processual.

Classes	Fract (1-2)	Vgf (1-3)		Frg_dess (1-2)	Vg_p (1-3)	Vg_c (1-3)	Din_p (1-3)	Din_c (1-3)	Flt (1-3)
		Vgf_co	Vgf_d						
1	26	1	0	18	7	17	5	9	21
2	4	0	1	12	15	11	15	11	2
3		29	29		8	2	10	10	7

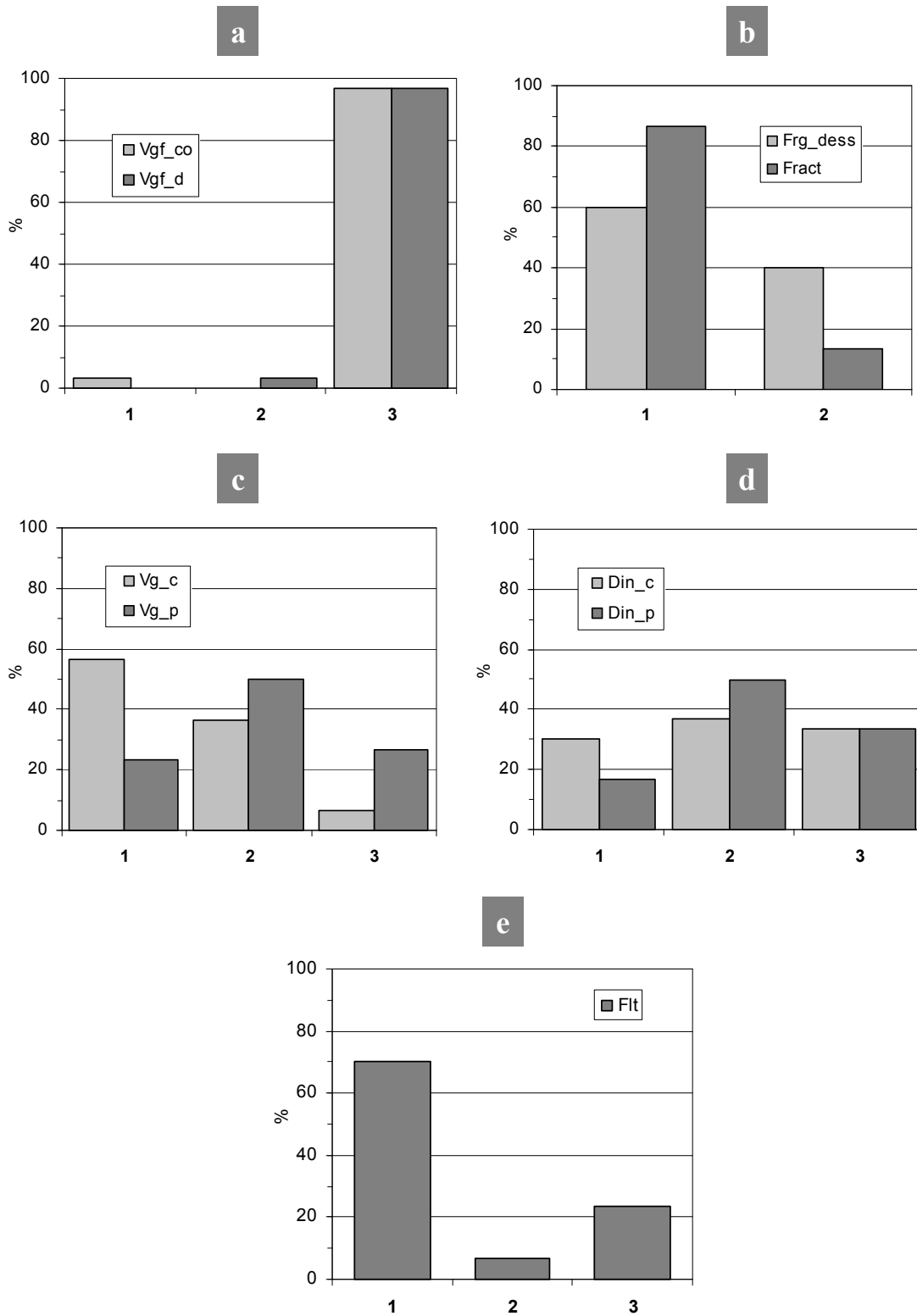


Figura 106 - Percentagens de formas por classe de cada variável processual. Códigos das variáveis foram já descritos na legenda da Tabela 90.

No que concerne à dinâmica nas paredes e na cabeceira (Figura 106 (d)) há em ambos os casos um predomínio de formas na classe 2, indicando a ocorrência de um sector declivoso em associação a um sector basal de declive suave, resultante do depósito de material

removido de montante, e que ocupa entre 1/3 e 2/3 da parede/cabeceira. De acordo com o esquema de classificação utilizado, esta classe foi assumida como identificando um grau de actividade intermédio, sendo a actividade mais intensa quanto maior a extensão do sector mais declivoso da parede/cabeceira, e menor a dimensão do depósito basal.

Não há contrastes marcados na distribuição das formas pelas classes 1 e 3 no caso das cabeceiras. Há, porém, um contraste maior no que diz respeito às paredes, em que apenas 17% das formas se apresentam na classe 1 contra 33% na classe 3, o que indica que apenas uma proporção reduzida das formas apresenta paredes na classe de maior dinamismo.

A Figura 106 (b) mostra que a maioria das formas apresenta fracturas de tensão e de dessecação apenas pontualmente, ou não apresenta de todo. Esta maioria é mais importante no contexto das fracturas de tensão, com apenas 13% das formas apresentando este fenómeno de forma sistemática ao longo do perímetro. Um exemplo deste tipo de fracturação é apresentado na Figura 107 (a), sendo um exemplo de fragmentação por dessecação apresentado na Figura 107 (b).

O *fluting* (Figura 106 (e)) ocorre apenas pontualmente na maioria dos casos (70%), ou não ocorre de todo. Uma pequena parte das formas (7%) apresenta o processo de forma incipiente (*flutes* centimétricas), com uma percentagem maior (23%) mostrando *flutes* bem desenvolvidas (exemplo na Figura 108).



Figura 107 - Fracturas de tensão ao longo do perímetro da forma F29 (a); Padrão de fracturação por dessecação na forma F26 (b).

A caracterização dos sistemas de ravinas no terreno tornou claro que não existem contrastes marcados em termos de processos activos e grau de actividade. As formas encontram-se estabilizadas nos fundos, sem canais capazes de transportar o material removido para a rede de drenagem das bacias, das quais, como já foi referido, se encontram desconectadas. Este padrão indica desde logo uma dinâmica onde o escoamento superficial só poderá ter relevância no contexto de eventos hidrológicos excepcionais, capazes de remover os depósitos nos fundos e conectar novamente, e de forma temporária, as formas com as bacias. A actividade erosiva actual concentra-se assim nas paredes e cabeceiras, onde muitas formas apresentam extensões significativas sem vegetação e configurações relativamente verticais. Nestes sectores, as fracturas de tensão mostraram ocorrer de forma sistemática numa pequena minoria das formas (c. 13,3%), enquanto que o *fluting* e a fragmentação por dessecação parecem ter maior relevância na dinâmica actual ao afectarem respectivamente 30 e 40%.



Figura 108 - *Fluting* bem desenvolvido. Forma F27.

4.3. Relações processos-morfologia

Após a caracterização geral do conjunto de 30 sistemas de ravinas quanto aos processos, procurou-se investigar a existência de relações entre estes últimos e a morfologia anteriormente descrita. Recorreu-se à técnica da análise discriminante a fim de verificar até que ponto as seis componentes principais anteriormente definidas (III.4.1.8.2) permitem diferenciar os grupos de formas inseridos nas diferentes classes dos processos observados.

A análise discriminante (AD) é uma técnica estatística multivariada que pode ser usada com três objectivos:

- (1) Identificar as variáveis que melhor diferenciam entre dois ou mais grupos de unidades de análise estruturalmente diferentes e mutuamente exclusivos;
- (2) Utilizar estas variáveis para criar um índice ou função discriminante que reproduza de forma parcimoniosa as diferenças entre os grupos;
- (3) Utilizar esta função para classificar *a priori* novos indivíduos nos grupos (Maroco, 2007: 513).

No contexto do ravinamento, Donker e Damen (1984) usaram AD para diferenciar, com base na topografia e na litologia, áreas ravinadas de não ravinadas no SE de Espanha. Mais recentemente, Morgan e Mngomezulu (2003) recorreram à mesma técnica com o mesmo fim na Suazilândia, usando como variáveis independentes o declive e a área de drenagem.

Em ordem a atingir o primeiro objectivo da AD, o SPSS 15.0 permite utilizar diferentes métodos, sendo o mais habitualmente usado aquele que assenta na estatística Λ de Wilks⁹⁶. Partindo de um conjunto inicial de p variáveis e k grupos, este indicador é formulado para cada uma como:

$$\Lambda = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y})^2}$$

sendo \bar{Y}_i a média no grupo i , e \bar{Y} a média da totalidade das unidades de análise. É importante referir aqui que o numerador da expressão consiste, usando a terminologia da ANOVA, na soma dos quadrados dos erros (SQE), sendo o denominador a soma dos quadrados totais (SQT, conforme Maroco, 2007: 159). Uma variável tenderá a discriminar melhor entre os grupos em consideração quanto menor for SQE (i.e. heterogeneidade dentro dos grupos) e maior for SQF (i.e. as diferenças entre os grupos⁹⁷). O SPSS calcula automaticamente o *p-value* associado ao Λ de Wilks, permitindo ou não rejeitar a hipótese (H_0) de que as médias de todos os grupos em análise são semelhantes.

O uso da estatística Λ está condicionado por três pressupostos: que as variáveis provêm de uma população normal multivariada, com matrizes de variância/covariância de cada grupo homogêneas, e que nenhuma variável é uma combinação linear de outras (i.e. não há variáveis colineares) (Maroco, 2007: 515).

Uma vez definidas p variáveis relevantes para diferenciar um total de g grupos, é possível estabelecer um número de m funções discriminantes equivalente ao valor mais baixo de entre

⁹⁶ Os restantes são a distância de Mahalanobis, o V de Rao, e o rácio F entre grupos.

⁹⁷ Notar que SQT = SQE+SQF (Maroco, 2007: 158).

dois: o número de grupos (g) menos um, ou o número de variáveis em análise (p) (Hill e Lewicki, 2006: 151). Formalmente, $m = \min(g-1, p)$. Estas m funções são uma combinação linear das p -variáveis:

$$D_i = w_{i1} \cdot X_1 + w_{i2} \cdot X_2 + \dots + w_{ip} \cdot X_p \quad (i = 1, \dots, m)$$

sendo os pesos $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ip}$ estimados de forma a que a variabilidade dos *scores* da função (D_i) seja máxima entre os grupos e mínima dentro dos grupos. Formalmente, pretende-se maximizar o rácio $SQF(D_i)/SQE(D_i)$:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}$$

sendo n_i o número de unidades de análise em cada um dos k grupos.

Após a obtenção da primeira função, o cálculo dos pesos para as funções discriminantes seguintes está sujeito à restrição de que os *scores* das funções não estejam correlacionados.

No presente caso, pretendeu-se averiguar até que ponto a morfologia dos sistemas de ravinas, expressa através das seis componentes principais já descritas, permite classificar cada um destes sistemas na sua classe quanto às diferentes variáveis processuais estudadas. Um resultado positivo indicaria a existência de uma relação significativa entre forma e processo.

Em ordem a assegurar a manutenção dos pressupostos associados à análise discriminante, realizaram-se testes de Kolmogorov-Smirnov para aferir a normalidade das variáveis independentes (as seis CP). Tendo-se obtido *p-values* de, respectivamente 0,169, 0,499, 0,856, 0,982, 0,776 e 0,864, não foi possível rejeitar a hipótese de normalidade para nenhuma delas com $p \leq 0,05$. De acordo com Maroco (2007: 515), aceita-se de uma forma geral que se cada uma das variáveis possui distribuição normal, a distribuição do conjunto de variáveis é normal multivariada.

Também foi assumido que nenhuma das CP é uma combinação linear de outras, dado que, conforme a metodologia da análise de componentes principais (já descrita em III.4.1.8.2), as componentes extraídas de um conjunto de variáveis são independentes entre si (Maroco, 2007: 329). Por último, e de forma a aferir a igualdade das matrizes de variância/covariância entre os vários grupos para cada variável, foram realizados testes M de Box, apresentados com os resultados da análise discriminante na Tabela 92.

Foram analisadas todas as variáveis processuais com exceção da ocorrência de vegetação nos fundos. Neste caso, verificou-se que apenas uma das unidades de análise não se situou na

classe 3 em qualquer um dos dois sectores em que o fundo dos sistemas de ravinhas foi dividido (corpo e desembocadura).

Usou-se o método *stepwise* implementado no SPSS 15.0. O algoritmo começa sem qualquer variável, e nos passos subsequentes as variáveis são adicionadas ou removidas consoante a sua contribuição para a capacidade discriminante da 1ª função discriminante. A cada passo, uma dada variável é adicionada se aumenta significativamente a capacidade discriminante da função, e removida se a sua ausência não influencia esta capacidade de forma significativa. Como indicador da capacidade discriminante usou-se o Λ de Wilks, sendo que o SPSS 15.0 calcula uma estatística F com base neste indicador para quantificar a significância da inserção/exclusão de cada variável na análise. A formulação é dada em Maroco (2007: 542), tendo-se adoptado os valores de *p-value* inseridos por defeito no *software*: 0,05 para a inserção, e 0,10 para a exclusão de variáveis.

Finalmente e ainda no que concerne à metodologia, é importante referir que foi usada a totalidade das 30 formas em todas as análises, o que implicou que os resultados foram validados classificando os mesmos sistemas de ravinhas que serviram para obter as funções discriminantes. Embora tal implique um aumento aparente da capacidade discriminante que seria evitado se se tivessem usado formas independentes para testar as funções (cf. Hill e Lewicki, 2006: 164), optou-se mesmo assim por usar todas as formas, justificando-se esta opção pela dimensão relativamente pequena do conjunto disponível. Procurou-se assim maximizar a representatividade das funções discriminantes obtidas face ao conjunto de formas conhecido, mesmo com tal implicando uma leitura mais cautelosa dos resultados. Estes são apresentados com respeito a cada uma das variáveis processuais na Tabela 92, sendo analisados de seguida.

De forma a permitir a interpretação dos resultados, construiu-se para cada uma das variáveis processuais um gráfico relacionando a classe em que cada forma se inseriu e o seu *score* segundo a função discriminante (para as variáveis discriminadas por uma só função) ou os dois *scores* das funções discriminantes (para aquelas discriminadas por duas funções). Nestes casos, foram também incluídos no gráfico os centróides de cada classe, ou seja, os pontos que resultam do cruzamento entre os *scores* médios por classe nas duas funções. No caso das variáveis discriminadas por uma só função, representaram-se os *scores* médios em associação às classes respectivas.

Tabela 92 - Resultados da análise discriminante. *Proc* - processo; *MB* - *p-value* obtido com um teste M de Box à igualdade das matrizes de variância-covariância entre os diferentes grupos associados a cada processo; *% var* - percentagem da variância explicada pela função em termos das diferenças entre grupos. *Sig* - grau de significância associado a cada função obtida.

Proc	MB	Funções	% var	Variáveis (coeficientes)	Sig	% Classificação correcta
Vg_c	0,790	1	100	CP2 (1,182)	0,003	73,3
Vg_p	0,002	1 2	85,4 14,6	CP1 (1,159); CP2 (0,709) CP1 (-0,538); CP2 (0,879)	0,000* 0,036	70,0
Din_c	0,612	1	100	CP2 (1,229)	0,001	63,3
Din_p	0,002	1 2	55 45	CP1 (0,950); CP2 (-0,716) CP1 (0,692); CP2 (0,918)	0,000* 0,001	73,3
Frc_p	0,763	1	100	CP3 (-0,753); CP5 (0,835)	0,017	86,7
Frg_dess	0,181	1	100	CP2 (1,070)	0,018	73,3
Flt	0,834	1	100	CP1 (1,071)	0,038	73,3

* Em todas as situações em que foram consideradas significativas duas funções, o valor de significância associado à função 1 refere-se ao conjunto das duas funções. O valor associado à função 2 descreve apenas a significância desta individualmente.

No que diz respeito à vegetação na cabeceira (*Vg_c*), a CP2 revelou-se capaz de discriminar significativamente entre as três classes possíveis, classificando correctamente 73% dos sistemas de ravinas. Tal não significa, porém, que tenha discriminado entre todos os possíveis pares de classes, mas sim que o fez pelo menos entre uma das classes e as restantes. A Figura 109 mostra que é este o caso, com esta discriminação ocorrendo claramente entre a classe 1 (vegetação inexistente ou pontual) e as outras, mas não entre a classe 2 (vegetação sistemática, mas sector de topo ou áreas descontínuas descobertas) e 3 (cobertura total por vegetação). Relembre-se neste ponto que a CP2 está positivamente correlacionada com a razão largura/profundidade média (i.e. suavização do declive transversal), e inversamente correlacionada com o declive na cabeceira (Tabela 87). Assim, as formas com perfis transversais mais entalhados e cabeceiras mais declivosas (i.e. *scores* mais baixos) tendem a apresentar menos vegetação na cabeceira, ainda que com bastante sobreposição entre as diferentes classes. Esta relação sugere dois possíveis mecanismos, potencialmente ocorrendo em simultâneo: o declive relativamente elevado dificulta fisicamente a instalação de vegetação, e o mesmo declive promove a ocorrência de movimentos de massa com frequência relativamente elevada, eliminando a vegetação que se instale e levando à exposição do rególito.

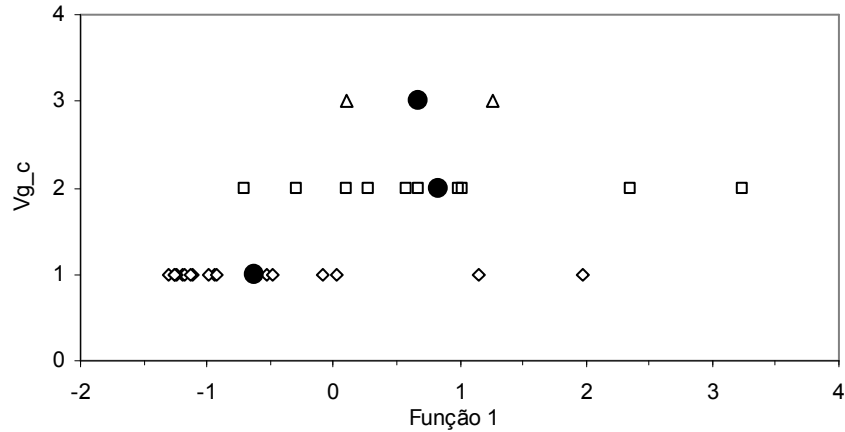


Figura 109 - Scores da função discriminante (*Função 1*) por classe de vegetação na cabeceira (*Vg_c*; 1-3). Círculos a negro representam os *scores* médios por classe.

Analisou-se de seguida a dinâmica na cabeceira (*Din_C*), também relacionada de forma significativa com a CP2 (63% dos sistemas de ravinas correctamente classificados), embora menos do que o verificado face à vegetação. A Figura 110 mostra que a classe 1 (cabeceiras com acumulações de material erodido apenas na base e correspondendo a menos do que 1/3 da altura total) tende a concentrar os sistemas de ravinas com *scores* mais baixos, com as classes 2 e 3 (sectores tendencialmente verticais cada vez menores e depósitos basais ocupando porções progressivamente maiores da parede) associadas a *scores* cada vez mais elevados. Há uma sobreposição importante entre os valores associados a classes sucessivas.

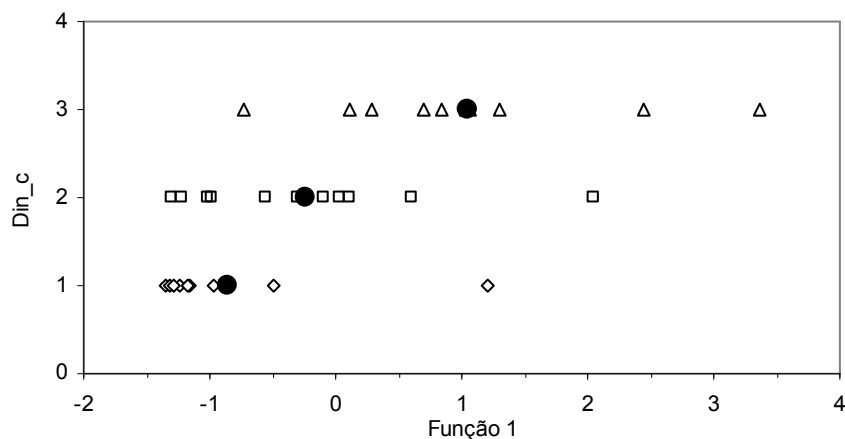


Figura 110 - Scores da função discriminante (*Função 1*) por classe de dinâmica na cabeceira (*Din_c*; 1-3). Círculos a negro representam os *scores* médios por classe.

Ficou claro através da análise das duas últimas figuras que as formas com perfis transversais suavizados e cabeceiras pouco declivosas (i.e. *score* elevado) tendem a ter estas últimas mais dominadas pela vegetação e por maiores acumulações basais de material, ou seja, com um

menor grau de actividade. Por oposição, os sistemas de ravinas mais entalhados tendem a ter cabeceiras mais activas, numa clara associação entre morfologia e processo.

As três classes de vegetação nas paredes (Vg_p) são discriminadas por duas funções, ambas integrando as CP1 e CP2 (Figura 111 e Tabela 92). A análise da figura mostra que a função 1 discrimina entre a classe 1 (vegetação inexistente ou pontual) e as restantes (classe 2: vegetação sistemática, mas com distribuição muito dispersa ou contínua mas muito pouco densa; classe 3: vegetação densa e homogénea, seja com distribuição contínua ou descontínua), representando, de acordo com a Tabela 92, 85,4% da variância explicada em termos das diferenças entre grupos. A função 2 discrimina, com resultados visivelmente inferiores, apenas a classe 3 das restantes. É notório que a diferenciação entre as classes 2 e 3 é pouco clara em qualquer uma das funções devido à grande sobreposição das nuvens de dados respectivas, tornando-se mais perceptível com base nos respectivos centróides.

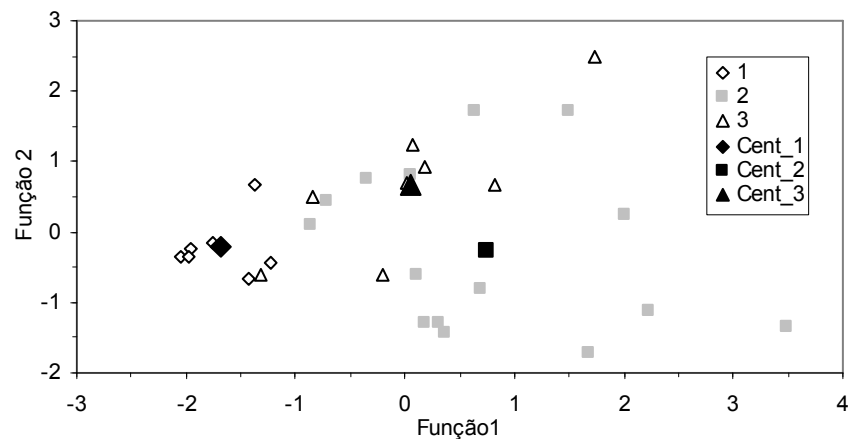


Figura 111 - *Scores* das duas funções discriminantes por classe de vegetação nas paredes (Vg_p ; 1-3). $Cent_1$ a $Cent_3$ são os centróides associados a cada classe.

De acordo com os coeficientes associados à função 1, as formas tendem a apresentar menos vegetação nas paredes quando são mais entalhadas (CP2 mais reduzida) e menores (CP1 mais reduzida). A função 2, por outro lado, mostra que as paredes tendem a estar completamente dominadas pela vegetação (classe 3) quando possuem um valor relativamente elevado na CP2 (coeficiente 0,879), mas um valor relativamente reduzido na CP1 (coeficiente -0,538). De acordo com as variáveis morfológicas associadas a cada uma destas duas componentes principais, este resultado pode ser interpretado como indicando que as formas totalmente dominadas pela vegetação tendem a ser as que conjugam perfis transversais relativamente suaves (CP2) com dimensões relativamente reduzidas (CP1).

Finalmente, e em função da incapacidade de qualquer uma das duas funções para discriminar esta classe face às restantes, é de salientar a grande dispersão nos *scores* associados às formas na classe 2, e que sugere a existência de outro ou outros factores de controlo sobre a ocorrência de vegetação nas paredes para além da morfologia (e.g. litologia).

Tal como a vegetação nas paredes, a dinâmica nas paredes (*Din_p*) é discriminada por duas funções das CP1 e CP2 (Figura 112), que permitiram classificar correctamente 73% das formas.

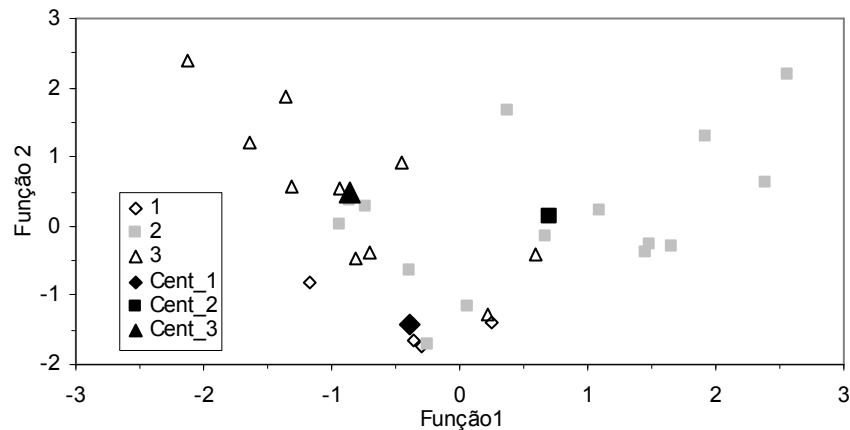


Figura 112 - *Scores* das duas funções discriminantes por classe de dinâmica nas paredes (*Din_p*; 1-3). *Cent_1* a *Cent_3* são os centróides associados a cada classe.

A função 2 discrimina claramente entre a classe 1 (paredes apresentando acumulações basais de material erodido < 1/3 da sua altura total) e as classes 2 e 3 (associadas respectivamente a acumulações basais entre 1/3 e 2/3, e superiores a 2/3 da altura das paredes). De acordo com os coeficientes da função (Tabela 92), as formas tenderão a pertencer às classes 2 e 3 quanto mais suavizados forem os seus perfis transversais (CP2; coeficiente 0,918) e quanto maiores forem as suas dimensões (CP1; 0,692).

Ao contrário da função 2, a função 1 discrimina sobretudo entre a classe 2 e as restantes, variando directamente com a CP1 e inversamente com a CP2. Por outras palavras, será tanto maior quanto maiores as dimensões, e mais entalhado o perfil transversal de um dado sistema de ravinas. Como consequência, a análise da Figura 112 torna evidente que (tal como já observado para a vegetação nas paredes) as formas na classe 3 tendem a ser de menores dimensões e perfil transversal menos entalhado do que as formas na classe 2.

Por último, e com respeito tanto à vegetação como à dinâmica nas paredes (*Vg_p* e *Din_p*), é importante levar em conta que foi possível, com base no teste M de Box, rejeitar a hipótese de igualdade das matrizes de variância-covariância dos diferentes grupos (Tabela 92). Dado que

não foi possível cumprir este pressuposto da análise discriminante, os resultados referentes a estas duas variáveis devem ser interpretados com precaução.

As duas classes definidas com respeito à ocorrência de fracturas de tensão ao longo do perímetro (*Frc_p*) podem ser discriminadas por uma função das CP3 e CP5, tendo esta permitido classificar correctamente 87% dos sistemas de ravinhas em estudo. Notavelmente, esta revelou-se a única variável processual para cuja discriminação estas duas componentes contribuem. Conforme a Figura 113 ilustra, os sistemas de ravinhas em que a fracturação de tensão não ocorre ao longo do perímetro ou ocorre apenas pontualmente (classe 1) são caracterizados por *scores* mais elevados na função discriminante. A interpretação dos coeficientes da função (Tabela 92) mostra que estes sistemas de ravinhas tendem a apresentar um maior alargamento a montante face a jusante (coeficiente de 0,835 com CP5), bem como a serem menos alongados (menos comprimento por largura média) e mais declivosos nas cabeceiras (de acordo com o coeficiente de -0,753 entre a CP3 e o declive na cabeceira). De forma inversa, os sistemas de ravinhas com fracturação sistemática tendem a ser menos alargados a montante face a jusante, mais alongados, e com declives menores nas cabeceiras. Este padrão de relação forma-processo sugere que, havendo condições para a ocorrência sistemática de fracturação, o alargamento das formas dá-se de modo mais homogéneo ao longo do perímetro, e menos desigualmente centrado na cabeceira. Ao mesmo tempo, sugere que a mesma fracturação, ocorrendo sucessivamente, tende a produzir cabeceiras menos declivosas. É de notar que não se encontrou relação entre dimensões (CP1) ou o grau de entalhe (CP2) e fracturas de tensão, indicando que não é a altura ou a inclinação das paredes/cabeceiras o factor de controlo fundamental, e sugerindo um papel potencialmente importante por parte da litologia.

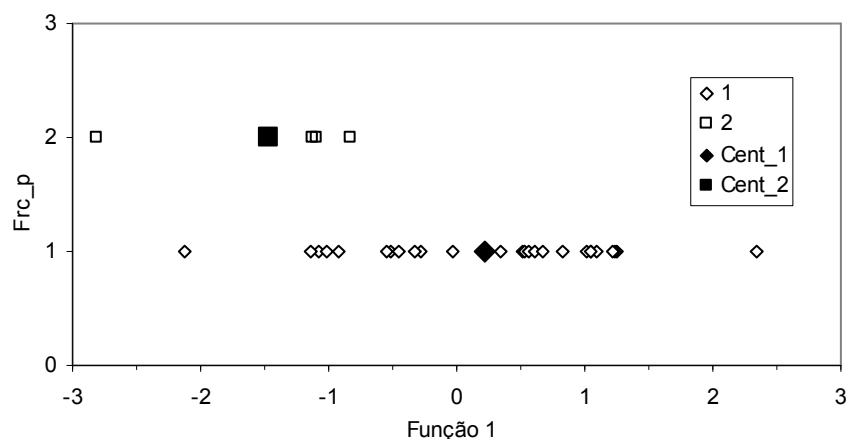


Figura 113 - *Scores* da função discriminante (*Função 1*) por classe de fracturação por tensão ao longo dos perímetros. (*Frc_p*; 1-2). *Cent_1* e *Cent_2* são os *scores* médios por grupo.

Considerando a fracturação por dessecação (*Frc_dess*), foi possível classificar correctamente 73% dos sistemas de ravinias usando apenas a CP2. A Figura 114 mostra que as formas em que o processo ocorre de modo sistemático (classe 2) tendem a ter *scores* mais elevados nesta componente principal, o que permite associar o processo a formas de perfil transversal relativamente suavizado e cabeceiras pouco declivosas.

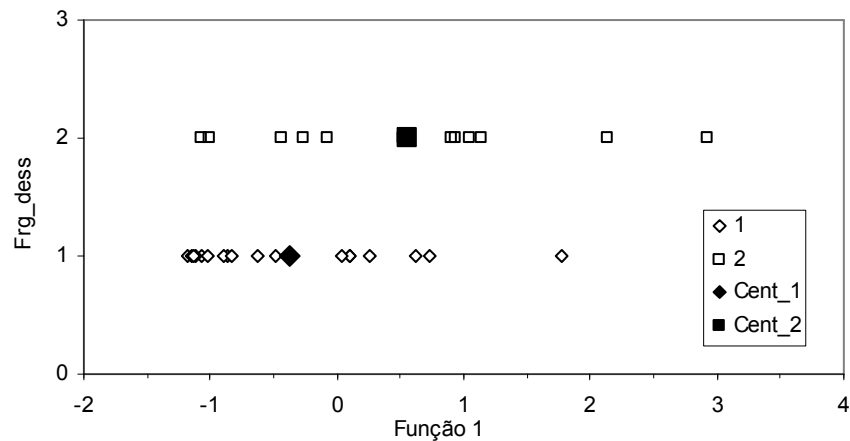


Figura 114 - *Scores* da função discriminante (*Função 1*) por classe de fracturação por dessecação (*Frg_dess*; 1-2). *Cent_1* e *Cent_2* são os *scores* médios por grupo.

Finalmente, considerou-se a ocorrência de *fluting* (*Flt*), processo face ao qual foi possível classificar correctamente 73% das formas com base exclusivamente na CP1 (correlacionada positivamente com as dimensões e negativamente com o declive no fundo). A Figura 115 mostra que há uma clara concentração das formas da classe 1 (*fluting* inexistente ou pontual) nos valores mais reduzidos. Embora as formas nas outras duas classes⁹⁸ se apresentem bastante dispersas, sobrepondo-se, as formas na classe 3 destacam-se mais claramente das da classe 1, mostrando que os sistemas de ravinias de maiores dimensões (e portanto paredes e cabeceiras com maiores desníveis) tendem mais a apresentar *fluting* de forma sistemática. A enorme dispersão evidente entre os pontos, porém, sugere um controlo importante por parte de outro ou outros factores sobre o processo.

⁹⁸ Classe 2: *fluting* sistemático com *flutes* de largura centimétrica; Classe 3: *fluting* sistemático com *flutes* de largura decimétrica.

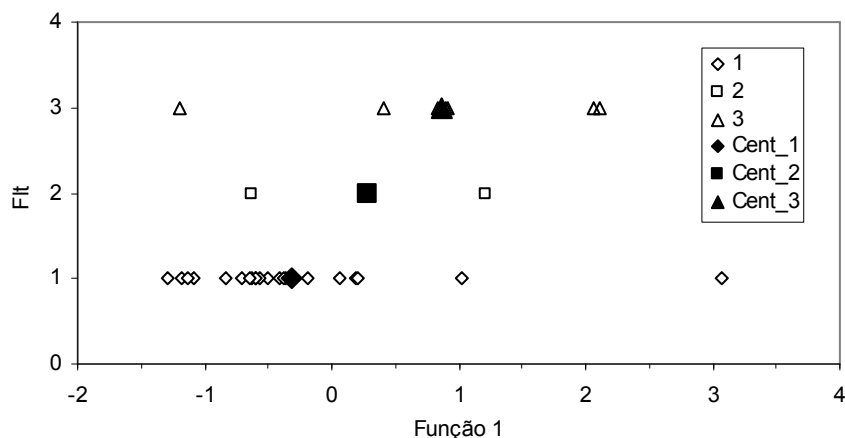


Figura 115 - Scores da função discriminante (*Função 1*) por classe de ocorrência de *fluting* (*Flt*; 1-3). *Cent_1* a *Cent_3* são os valores médios por classe.

Relações processo-morfologia: uma síntese

A análise dos resultados acima descritos para cada uma das variáveis processuais mostra que, mesmo assumindo alguma sobrevalorização da capacidade discriminante das variáveis independentes (neste caso as componentes principais que descrevem a morfologia dos sistemas de ravinas), há claras relações morfologia-processos entre os sistemas de ravinas estudados.

Em primeiro lugar, salienta-se a importância da CP2, directamente correlacionada com a razão largura/profundidade (tanto em termos médios para a totalidade de cada forma como especificamente para cada um dos seus sectores) e inversamente correlacionada com o declive nas cabeceiras (Tabela 87). Ficou definido que esta CP tem uma importante relação com a presença de vegetação e com a dinâmica nas cabeceiras e nas paredes das formas, sendo que valores mais baixos (i.e. perfis transversais mais entalhados e cabeceiras mais declivosas) estão associados a cabeceiras e paredes menos vegetadas e mais activas. Valores relativamente elevados de CP2 também mostraram estar relacionados com a ocorrência sistemática de fracturas de dessecação ao longo dos perímetros das formas, sugerindo aqui um papel importante por parte da litologia: as mesmas argilas que estão tendencialmente associadas à fracturação promoveriam a ocorrência relativamente frequente de movimentos de massa, alargando progressivamente as formas e promovendo valores de CP2 mais elevados.

Para além da CP2, a CP1 também revelou ter um papel importante. Esta está correlacionada com a maioria das variáveis morfológicas simples anteriormente analisadas (Tabela 87), exprimindo a dimensão (área, volume, largura, profundidade, etc.), e os declives no fundo (com os quais está inversamente correlacionada). Foi possível definir que valores

relativamente reduzidos tendem a estar associados a menos vegetação e a um maior dinamismo nas paredes. Juntamente com a importância acima descrita para a CP2, os resultados sugerem que as formas apresentam maior dinamismo numa fase inicial, com este a reduzir-se posteriormente à medida que as paredes se alargam e se tornam menos declivosas, o mesmo ocorrendo com as cabeceiras.

Em relação ao processo de *fluting*, valores elevados de CP1 estão associados à ocorrência sistemática do fenómeno, presumivelmente e pelo menos em parte devido às maiores dimensões das paredes e cabeceiras, com maiores superfícies expostas para produzir escoamento erosivo⁹⁹.

Finalmente, as CP3 e 5 permitiram classificar correctamente 87% dos sistemas de ravinas em estudo no que concerne à ocorrência de fracturas de tensão ao longo dos perímetros, revelando uma associação clara entre este processo e uma morfologia alongada, relativamente pouco alargada a montante face a jusante, e com declives menores nas cabeceiras. A ausência de relações entre o processo e as dimensões (CP1) ou o grau de entalhe (CP2) indica que não é a altura ou a inclinação das paredes/cabeceiras¹⁰⁰ o factor de controlo fundamental, sugerindo um papel relevante por parte de outro ou outros factores.

4.4. Factores de controlo

Após a consideração da morfologia e dos processos associados aos complexos de ravinas em estudo, centrou-se a atenção no papel desempenhado por um conjunto de factores passíveis de exercer controlo sobre estes processos. Estes factores constituem a terceira componente do enquadramento conceptual proposto no Capítulo I.6 e já ilustrado na Figura 86.

A metodologia desenvolvida processou-se em três fases sucessivas. Em primeiro lugar, foram obtidos os valores relativos a um conjunto de 14 variáveis passíveis de exercer controlo. Estas incluíram grande parte do conjunto já adoptado com relação às 90 formas foto-interpretadas no Capítulo III.3, bem como o contexto litológico, este último caracterizado com base na recolha e análise laboratorial de amostras de rególito. Considerando as diferenças face ao conjunto de variáveis anteriormente adoptado, é importante referir que não se utilizou a orientação dos sistemas de ravinas, que os resultados anteriores sugeriram não exercer efeito sobre a morfologia. Também não se incluiu na análise a razão entre a área do sistema de ravinas e a respectiva área de drenagem (Ar/A_{dren}), dado que este indicador pretende

⁹⁹ Para além do escoamento superficial, o impacto da precipitação tem sido referido como um factor de *fluting* (Donker e Damen, 1989: 292; Brooks et al., 2009: 1963).

¹⁰⁰ Uma relação com a dimensão ou o grau de entalhe sugeriria que, a partir de determinado limiar, as tensões originadas pela simples altura das paredes promoveriam o surgimento das fracturas.

descrever o estado dos sistemas de ravinas num dado momento, e não caracterizar as condições que lhes deram origem ou que controlaram a sua evolução ao longo do tempo. Os métodos de obtenção das variáveis e as características dos valores obtidos são apresentados em III.4.4.1.

Numa segunda fase, foram analisadas as relações entre os potenciais factores e a morfologia dos sistemas de ravinas (III.4.5). Embora qualquer controlo exercido incida sobre os processos de forma directa e sobre a morfologia necessariamente de forma indirecta, a existência de relações significativas permitiria inferir processos passados, mas actualmente ausentes¹⁰¹.

Finalmente, consideraram-se na terceira fase as relações entre os potenciais factores e os processos observados (III.4.6).

4.4.1. Obtenção dos dados

Para além do contexto litológico, considerado mais abaixo, foram adoptadas como possíveis variáveis de controlo a área de drenagem medida nas desembocaduras das formas (*A_dren*), e um conjunto de propriedades associadas à topografia antecedente de cada um dos sistemas de ravinas¹⁰²: as curvaturas de perfil e planar (*Cper*, *Cpl*), consideradas em termos dos seus valores mínimos, médios e máximos, o declive (*Dec*), o Índice de Potência do Escoamento (*IPE*), e o Índice Topográfico de Encharcamento (*ITE*), estes três últimos considerados em termos dos seus valores médios e máximos.

A caracterização dos indicadores e a justificação da sua adopção, bem como as metodologias usadas para os obter, foram já dadas nos Capítulos III.2.5 (declive e curvaturas), III.2.6 (área de drenagem) e II.2.1 (no caso dos dois índices topográficos) pelo que não serão aqui repetidas. Os valores finais, resultantes da aplicação destas metodologias aos polígonos dGPS adoptando como fonte de altimetria a topografia 1:10000, são apresentados nas Tabelas 93 e 94

¹⁰¹ A título de exemplo, uma associação entre perfis transversais suaves e um contexto litológico relativamente brando seria um bom indicador de maior dinamismo nas paredes no passado, mesmo que presentemente todas se encontrassem cobertas de vegetação e inactivas.

¹⁰² A metodologia usada para a reconstrução da topografia antecedente foi já apresentada em III.2.5.1

Tabela 93 - Valores obtidos para alguns dos potenciais factores de controlo considerados.
A_dren - área de drenagem (m²); *Cpl* e *Cper* são respectivamente as curvaturas planar e de perfil.

Código	A_dren	Cpl			Cper		
		min	med	max	min	med	max
F01	1384	-6,12	-1,14	3,63	-2,39	1,75	8,12
F02	2612	-4,59	-0,24	4,40	-3,30	-0,37	2,30
F03	2876	-0,78	0,45	4,52	-3,45	-0,30	0,86
F04	580	-2,21	0,28	5,52	-9,49	0,22	4,50
F05	6060	-1,59	0,54	4,79	-4,83	-0,27	2,12
F06	636	-0,29	0,60	1,86	-1,94	-0,08	0,91
F07	4140	-5,20	0,27	3,46	-3,05	-0,39	3,49
F08	23472	-4,06	0,24	3,21	-4,50	-0,26	4,82
F09	3236	-4,80	-0,95	0,60	-3,61	-0,50	4,84
F10	4224	-3,92	0,35	3,37	-4,34	-0,39	2,44
F11	2796	-5,88	-1,24	0,95	-2,55	-0,57	3,62
F12	3068	-5,82	0,16	1,65	-4,01	-0,04	6,76
F13	760	-1,03	0,00	1,39	-0,89	0,24	1,58
F14	5604	-12,44	-0,83	11,45	-24,59	-1,22	5,21
F15	5780	-25,86	0,07	34,58	-17,04	-0,49	16,19
F16	22340	-4,33	-0,61	4,62	-6,16	-1,02	4,25
F17	3236	-3,42	-0,86	1,38	-4,44	-0,27	5,70
F18	7732	-5,34	-0,62	3,09	-3,05	0,33	7,27
F19	2116	-7,25	-0,27	9,67	-4,78	0,35	7,42
F20	14304	-7,84	-1,03	3,96	-3,50	-0,37	6,23
F21	872	-0,67	0,32	2,66	-1,95	-0,24	0,71
F22	1848	-3,68	-0,87	1,21	-3,24	-0,57	9,96
F23	2700	-5,29	-0,93	3,15	-10,99	0,64	4,64
F24	8660	-9,11	-0,36	4,09	-6,21	0,65	6,66
F25	1224	-4,42	-0,68	2,02	-3,31	0,09	4,76
F26	10040	-4,57	-0,37	5,98	-3,63	0,36	6,74
F27	32096	-7,60	-0,46	5,57	-5,33	0,17	9,62
F28	556	-4,90	-1,11	2,14	-4,97	-0,82	3,54
F29	2404	-4,36	-0,35	1,83	-0,69	0,66	4,06
F30	50436	-47,44	-0,34	32,69	-29,57	-0,18	48,42
Média	7593	-6,83	-0,33	5,65	-6,06	-0,10	6,59
Min	556	-47,44	-1,24	0,60	-29,57	-1,22	0,71
Max	50436	-0,29	0,60	34,58	-0,69	1,75	48,42
DP	10880	8,82	0,55	7,84	6,46	0,57	8,38

Tabela 94 - Valores obtidos para os restantes potenciais factores de controlo considerados. *Dec* - declive (°); *IPE* e *ITE* são, respectivamente, o Índice de Potência do Escoamento e o Índice Topográfico de encharcamento.

Código	Dec		IPE		ITE	
	med	max	med	max	med	max
F01	28,78	39,62	22,65	104,57	3,90	6,90
F02	20,63	27,69	19,25	153,05	4,17	7,42
F03	14,67	20,91	5,33	22,57	4,00	5,14
F04	35,86	42,84	11,69	51,80	2,75	4,41
F05	19,80	28,08	8,16	231,68	3,68	6,85
F06	15,80	19,95	15,77	32,18	5,17	5,88
F07	18,73	27,92	9,82	226,16	3,94	7,15
F08	14,56	30,54	13,20	1102,24	4,44	8,39
F09	15,93	28,83	23,05	293,30	4,77	7,67
F10	18,18	29,08	11,86	41,07	4,25	5,64
F11	25,24	29,98	19,86	159,96	4,20	6,61
F12	14,05	23,72	6,59	25,67	4,40	6,21
F13	14,01	20,70	8,41	18,37	4,75	5,94
F14	20,83	48,13	19,00	323,37	3,86	8,18
F15	20,26	59,33	10,74	228,76	3,84	6,96
F16	22,24	37,08	11,57	160,19	3,60	7,02
F17	23,16	32,34	22,79	82,30	4,58	6,80
F18	18,72	27,93	25,96	310,56	5,06	9,90
F19	23,84	37,99	18,39	184,64	3,97	7,42
F20	18,65	32,20	36,61	1227,93	4,95	11,42
F21	17,23	22,65	14,27	30,04	4,91	5,76
F22	26,26	38,34	27,23	172,40	4,26	6,23
F23	22,77	37,95	27,51	464,31	4,21	9,76
F24	25,53	40,99	16,65	121,76	3,88	6,90
F25	19,90	27,38	12,47	79,05	4,43	7,38
F26	12,38	32,67	25,93	467,58	5,36	10,71
F27	12,19	31,53	43,06	2756,05	5,29	12,53
F28	20,91	26,59	17,06	127,93	3,87	6,33
F29	12,77	23,75	10,91	79,88	5,09	8,21
F30	16,08	54,13	25,38	1665,89	4,65	12,25
Média	19,66	32,69	18,04	364,84	4,34	7,60
Min	12,19	19,95	5,33	18,37	2,75	4,41
Max	35,86	59,33	43,06	2756,05	5,36	12,53
DP	5,25	9,38	8,66	582,71	0,58	2,00

4.4.1.1. Litologia

A caracterização dos complexos de ravinas quanto ao contexto litológico desenvolveu-se em duas etapas fundamentais.

Em primeiro lugar, cada uma das formas foi analisada individualmente no campo. Com base na observação dos perfis em evidência nas cabeceiras e paredes, foi descrita a sequência de materiais na qual o seu desenvolvimento teve lugar. A análise dos resultados obtidos para o conjunto de 30 formas permitiu diferenciar os principais contextos litológicos existentes. Esta

classificação, de natureza qualitativa, foi posteriormente integrada com os processos e com a morfologia.

Numa segunda fase, cujo propósito foi complementar os resultados da primeira, procurou-se caracterizar em maior detalhe as principais unidades litológicas associadas ao desenvolvimento das formas. Para isso, foi realizada uma campanha de campo a fim de recolher 3 amostras de cada unidade. Estas amostras, colhidas sempre em sistemas de ravinas distintos, foram depois submetidas a análises laboratoriais e caracterizadas face a um conjunto de parâmetros com implicações no comportamento hidrológico e mecânico dos materiais (e exercendo portanto controlo potencial face a diferentes processos morfogenéticos). Os resultados foram utilizados como apoio à interpretação das relações encontradas entre a litologia, a morfologia e os processos.

Etapa 1 - Contextos litológicos gerais

A análise das 30 formas no campo permitiu descrever as sequências de materiais ao longo dos perfis em evidência nas cabeceiras e paredes das formas. Esta análise assentou na observação visual e, em certa medida, foi condicionada pela própria natureza dos processos de erosão e deposição que controlam a evolução das formas em estudo. Embora grandes sectores das cabeceiras e paredes tenham os materiais em evidência, os sectores basais encontram-se cobertos por depósitos que ocultam, em maior ou menor grau, os materiais subjacentes. É importante referir que seria possível que transições litológicas ocorrendo junto aos fundos das formas fossem ocultadas por estes depósitos e subsequentemente omitidas, pelo que se assumiu que, a ocorrerem, estas situações não tiveram relevância nos resultados.

As descrições dos perfis litológicos observados nos vários complexos de ravinas são apresentadas nas Tabelas 95 e 96. Optou-se por considerar separadamente as formas em cada margem da rib^a de Ulme em função da falha geológica que (correspondendo aproximadamente ao traçado da ribeira) separa as duas margens, e para a qual Martins (2004: 54) definiu um rejeito de aproximadamente 50 m. Como consequência desta movimentação, marcada pela ascensão relativa da margem direita, não há continuidade em termos altimétricos entre ambas as margens no que diz respeito às características dos materiais.

É importante referir que as designações dadas neste ponto às principais formações reflectem a análise visual realizada, e não foram apoiadas por análises texturais. No caso específico dos materiais de textura mais fina, utilizou-se a designação "relativamente argiloso" em função da observação de dois fenómenos particulares: fracturas de dessecação (Figura 118), resultado

das mudanças volumétricas típicas das formações argilosas como resposta a variações no teor de humidade; e padrões mesclados de manchas esbranquiçadas e avermelhadas (Figura 119), correspondendo à alternância entre zonas de concentração e de escassez de óxidos de ferro/magnésio. Este padrão cromático está tipicamente associado a condições prolongadas de saturação com água, consentâneas com um teor elevado de argilas (em função da elevada capacidade de retenção de água) (Brady e Weil, 2008: 278, 286).

Tabela 95 - Perfis observados ao longo das paredes e cabeceiras das formas na margem esquerda da rib^a de Ulme. Formas são apresentadas por ordem decrescente de altitude máxima (correspondendo à altitude no ponto mais elevado da cabeceira), apresentada juntamente com a altitude mínima. Materiais são descritos por ordem descendente de ocorrência no perfil de cada forma.

Código (altitude, m)	Materiais (ordem descendente)
F30 (170-110)	1. Conglomerados compactos. 2. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas. 3. Arenito amarelado, por vezes esbranquiçado. Apresenta localmente fracturas de dessecação.
F20 (150-125)	1. Conglomerados compactos. 2. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas.
F22 (145-125)	1. Conglomerados compactos. 2. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas.
F19 (143-120)	1. Conglomerados compactos. 2. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas.
F02 (141-115)	1. Conglomerados compactos. 2. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas.
F11 (138-115)	1. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas.
F21 (135-127)	1. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas.
F18 (132-110)	1. Arenitos alaranjados, com intercalações conglomeráticas. 2. Arenitos amarelados. Fracturas de dessecação frequentes. Certos sectores, mais avermelhados e muito fracturados, parecem ser mais argilosos.
F16 (126-112)	2. Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas. 3. Arenito amarelado. Pequenas fracturas de dessecação sugerem textura relativamente mais argilosa.
F01 (107-95)	1. Arenito amarelado. Intercalações cascalhentas pontuais.
F06 (95-82)	1. Arenito esbranquiçado a avermelhado, cimentado, com intercalações conglomeráticas importantes. 2. Arenito amarelado grosseiro, com cascalho. Os clastos maiores apresentam-se tingidos de vermelho.
F12 (85-69)	1. Material relativamente argiloso alaranjado a avermelhado.
F13 (76-64)	1. Material relativamente argiloso alaranjado a avermelhado.
F29 (67-55)	1. Material relativamente argiloso alaranjado a avermelhado.

É também importante ter em conta que, no presente trabalho, o possível controlo por parte da litologia sobre os sistemas de ravinas em estudo foi considerado apenas em termos da presença/ausência de diferentes tipos de materiais, ou seja, em termos qualitativos. Não foi logisticamente viável realizar medições da espessura dos afloramentos observáveis nas paredes e cabeceiras de cada forma, o que permitiria naturalmente uma análise mais objectiva dos possíveis efeitos deste factor.

A análise da Tabela 95 permite desde logo definir uma sequência característica de materiais ocorrendo ao longo do sector da coluna estratigráfica abrangido pelas formas da margem esquerda da rib^a de Ulme. A partir do topo, e atribuindo numeração sucessiva a cada formação

distinta, ocorrem (1) conglomerados compactos, passando a (2) arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas (Figura 116). Estes são sucedidos por (3) um arenito relativamente amarelado (Figura 117), em que ocorre por vezes algum cascalho, disperso ou em intercalações lineares, e fracturas de dessecação (estas últimas sugerindo uma componente relativamente argilosa, pelo menos localmente). Finalmente, o arenito é seguido por (4) um material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada, com uma presença marcada de fracturas de dessecação (Figura 118).

A Tabela também mostra que a forma F06 apresenta materiais com características algo distintas das quatro formações acima enumeradas, na forma de um arenito esbranquiçado a avermelhado, cimentado, com intercalações conglomeráticas importantes, sobreposto a um arenito amarelado grosseiro, com cascalho (Figura 120).

As combinações de materiais observadas nas diferentes formas permitiram individualizar sete contextos litológicos diferentes, identificados na Tabela 97.



Figura 116 - Transição entre conglomerados (1) e arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas (2) na forma F02. Notar pessoa no canto superior direito para uma noção de escala.



Figura 117 - Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas pontuais (formação 3), na forma F01. Forma F02 é visível ao fundo. Notar diferença de altitudes entre ambas.



Figura 118 - Material relativamente argiloso alaranjado a avermelhado (formação 4), tal como ocorre na forma F29. Notar a ocorrência generalizada de fracturas de dessecação.



Figura 119 - Padrão mesclado de manchas avermelhadas e esbranquiçadas, indicando drenagem reduzida e interpretado como sugerindo um elevado teor em argila. Forma F25, na margem direita da ribeira de Ulme.

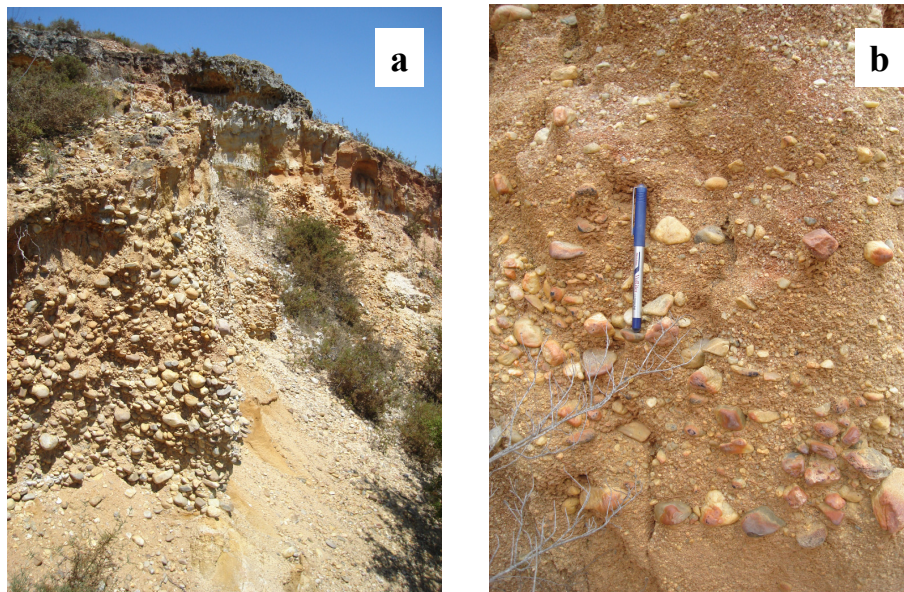


Figura 120 - As duas formações associadas exclusivamente à forma F06: (a) arenito esbranquiçado a avermelhado, cimentado, com intercalações conglomeráticas importantes, e (b) arenito amarelado a avermelhado, grosseiro, com cascalho.

Centrando a atenção nos sistemas de ravinas na margem direita da rib^a de Ulme, tornou-se evidente ao longo das análises realizadas que este conjunto de formas pode ser dividido em dois grupos, havendo características distintas nas formas localizadas nas bacias da rib^a de Ulme e da rib^a do Vale do Casal Velho (Tabela 96).

Tabela 96 - Perfis observados ao longo das paredes e cabeceiras das formas ocorrendo na margem direita da rib^a de Ulme. Formas são apresentadas por ordem decrescente de altitude máxima (correspondendo à altitude no ponto mais elevado da cabeceira), apresentada juntamente com a altitude mínima. Materiais são descritos por ordem descendente de ocorrência no perfil. As formas com asterisco ocorrem na rib^a do Vale do Casal Velho.

Código (altitude, m)	Materiais (ordem descendente)
F8* (169-125)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F07 (151-120)	1. Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho. Intercalações cascalhentas bem marcadas. 2. Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F09* (135-121)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F05 (133-96)	1. Arenitos alaranjados a avermelhados com bastante cascalho. 2. Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F10* (121-90)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F24 (117-87)	1. Arenito alaranjado a avermelhado, com cascalho. 2. Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas. 3. Material avermelhado relativamente argiloso.
F23 (109-85)	1. Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas. 2. Material avermelhado relativamente argiloso.
F27 (109-60)	1. Arenito alaranjado a avermelhado, com algum cascalho. 2. Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas. 3. Material avermelhado relativamente argiloso.
F4 (101-90)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F25 (100-90)	1. Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas. 2. Material avermelhado relativamente argiloso. Fracturas de dessecação sistemáticas.
F15* (97-53)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas
F3 (90-74)	Material avermelhado relativamente argiloso
F17* (88-70)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F26 (87-59)	Material avermelhado relativamente argiloso
F28 (84-76)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.
F14* (79-65)	Arenito amarelado com intercalações cascalhentas e argilosas.

A sequência de materiais que caracteriza os complexos de ravinas na rib^a de Ulme é limitada no topo por (1) arenitos de cor alaranjada a avermelhada com algum cascalho (Figura 121). Estes são sucedidos por uma camada de (2) arenitos amarelados, com intercalações ora marcadamente cascalhentas ora argilosas (estas últimas apresentando abundantes fracturas de dessecação) (Figura 122). Os arenitos são finalmente seguidos por (3) um material relativamente argiloso de cor avermelhada, frequentemente apresentando fracturas de dessecação (Figura 123).

Os perfis dos sistemas de ravinas na bacia da rib^a do Casal Velho diferem dos da rib^a de Ulme em função da ausência da camada de arenitos de cor alaranjada a avermelhada com cascalho a

limitar o topo, sendo este aqui definido pelos já referidos arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (formação 2) (Figura 122).

Os perfis apresentados na Tabela 96 permitiram associar cinco contextos litológicos distintos às formas na margem direita da rib^a de Ulme. Estes são apresentados na Tabela 97, juntamente com os contextos definidos na margem esquerda.

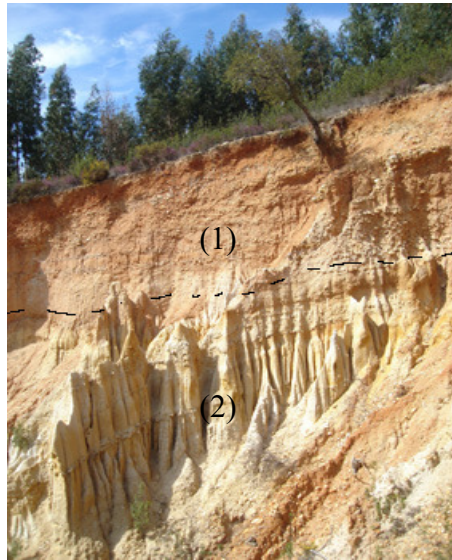


Figura 121 - Sucessão de arenitos de cor alaranjada a avermelhada com cascalho (1) e arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e intercalações relativamente argilosas (2). Notar a ocorrência de *fluting* nos segundos mas não nos primeiros, indicando comportamentos mecânicos diferenciados. Forma F07, na margem direita da rib^a de Ulme.



Figura 122 - Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e intercalações relativamente argilosas (formação 2) na parede da forma F10. Rib^a do Vale do Casal Velho. Notar o facto de esta formação definir o topo do perfil, ao contrário do que ocorre na margem direita da rib^a de Ulme, e também a ocorrência generalizada de *fluting*.



Figura 123 - Material avermelhado relativamente argiloso (formação 3), dominando a forma F26.

Tabela 97 - Os diferentes contextos litológicos definidos para os 30 sistemas de ravinas em estudo. A primeira letra no código identifica a margem da rib^a de Ulme (E - esquerda; D - direita).

Código	Sequência de formações (desde o topo)	Formas
E1	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F30
E2	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F02, F19, F20, F22
E3	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F11, F21
E4	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12, F13, F29
E5	Arenitos amarelados	F01
E6	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F18, F16
E7	Arenitos esbranquiçados a avermelhados, cimentados, com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados grosseiros, com cascalho	F06
D1	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F04, F08, F09, F10, F14, F15, F17, F28
D2	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F05, F07
D3	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F24, F27
D4	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F23, F25
D5	Material avermelhado relativamente argiloso	F26, F03

Etapa 2 - Principais unidades litológicas: análise e características

As observações acima descritas permitiram individualizar sete tipos distintos de rególito, cujas várias combinações configuram os contextos litológicos em que as 30 formas em análise se desenvolveram até ao presente. Em ordem a caracterizar cada um destes tipos de material, colheram-se três amostras, sempre em complexos de ravinas distintos. Estas foram depois caracterizadas em termos de diferentes parâmetros com recurso a análises laboratoriais, sendo os valores finais para cada tipo de material constituídos pelas médias entre os três valores

obtidos. Optou-se por usar sempre três amostras por tipo de material a fim de promover a representatividade dos resultados, tendo-se considerado logisticamente inviável usar um número superior. Porém, foi por vezes necessário, para um dado tipo de material, extrair mais do que uma amostra por sistema de ravinas. Tal ocorreu quando os materiais em análise se caracterizaram pela presença de intercalações com características visivelmente contrastantes face ao resto do material. Nestes casos, o material predominante e as intercalações foram analisados separadamente, tal como se se tratassem de materiais distintos¹⁰³.

A Tabela 98 mostra o código identificador de cada uma das amostras colhidas, bem como o tipo de rególito a que se refere e o complexo de ravinas de onde foi extraída.

Uma vez recolhidas as amostras, cada uma foi analisada a fim de caracterizar os diferentes materiais com respeito a dois parâmetros: a textura e a tendência para a dispersão (esta última afectando, naturalmente, os materiais mais argilosos).

Adoptou-se o índice de Middleton para caracterizar a dispersividade dos materiais. Este indicador consiste, muito simplesmente, na razão entre as percentagens de silte e argila medidas dispersando uma amostra de material em água, e numa solução dispersante (Zachar, 1982: 165; Vandekerckhove *et al.*, 2000b: 45). Formalmente:

$$R = (\text{silte} + \text{argila})_{\text{não disperso}} / (\text{silte} + \text{argila})_{\text{disperso}}$$

Quanto mais próximo de 1 for o valor final, maior será a tendência do material para se dispersar em contacto com a água, ou seja, em condições naturais de humedecimento. De acordo com o autor do índice, um valor superior a 0,15 indicará um material erodível (Middleton, 1930, referido por Vandekerckhove *et al.* (2000b: 45)).

São de seguida descritos os procedimentos levados a cabo durante a recolha e análise das amostras.

Em primeiro lugar, foi necessário definir a dimensão da amostra a extrair para cada formação. As descrições e as figuras acima apresentadas tornaram já claro que existe grande variabilidade nas características texturais dos materiais em presença, pelo que as dimensões das amostras foram necessariamente ajustadas a esta variabilidade. Procurando seguir as indicações de Carvalho (2005: 134) e Kroetsch e Wang (2008: 723), analisou-se no campo o diâmetro mediano (i.e. largura) máximo presente em cada material, e definiu-se a massa a

¹⁰³ Verificou-se esta situação com os arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas (margem esquerda da ribª de Ulme), e com os arenitos amarelados com intercalações argilosas e cascalhentas (margem direita). Neste último caso, foram extraídas três amostras em cada um dos três sistemas de ravinas visitados: o arenito (predominante), e os dois tipos de intercalações. Todas as amostras e respectivas proveniências são devidamente identificadas na Tabela 98.

extrair para cada amostra com base nos valores apresentados em Kroetsch e Wang (2008: 723), cuja representação gráfica é mostrada na Figura 124.

Tabela 98 - O conjunto de amostras recolhido e as litologias associadas. As primeiras letras do código indicam a margem da rib^a de Ulme de onde foi extraída cada amostra (ME ou MD), o tipo de rególito (REG) e o número da amostra (AM1 a AM3). A título de exemplo, a primeira linha (MERE1AM1) indica a amostra número 1, do primeiro tipo de rególito definido na margem esquerda. A numeração dos tipos de rególito (REG) segue a ordem pela qual estes tipos foram descritos no texto.

Código	Formação	Forma
MERE1AM1	Conglomerados compactos	F02
MERE1AM2	Conglomerados compactos	F19
MERE1AM3	Conglomerados compactos	F30
MERE2AM1	Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas	F02
MERE2AM1B	Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas (intercalação)	F02
MERE2AM2	Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas	F19
MERE2AM2B	Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas (intercalação)	F19
MERE2AM3	Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas	F30
MERE2AM3B	Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas (intercalação)	F30
MERE3AM1	Arenitos amarelados	F01
MERE3AM2	Arenitos amarelados	F16
MERE3AM3	Arenitos amarelados	F30
MERE4AM1	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F13
MERE4AM2	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12
MERE4AM3	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F29
MDRE1AM1	Arenitos alaranjados a avermelhados, com algum cascalho	F27
MDRE1AM2	Arenitos alaranjados a avermelhados, com algum cascalho	F24
MDRE1AM3	Arenitos alaranjados a avermelhados, com algum cascalho	F07
MDRE2AM1	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente mais arenosa)	F10
MDRE2AM1B	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente mais argilosa)	F10
MDRE2AM1C	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente cascalhenta)	F10
MDRE2AM2	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas	F05
MDRE2AM2B	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente mais argilosa)	F05
MDRE2AM2C	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente cascalhenta)	F05
MDRE2AM3	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas	F08
MDRE2AM3B	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente mais argilosa)	F08
MDRE2AM3C	Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente mais cascalhenta)	F08
MDRE3AM1	Material avermelhado relativamente argiloso	F03
MDRE3AM2	Material avermelhado relativamente argiloso	F26
MDRE3AM3	Material avermelhado relativamente argiloso	F24

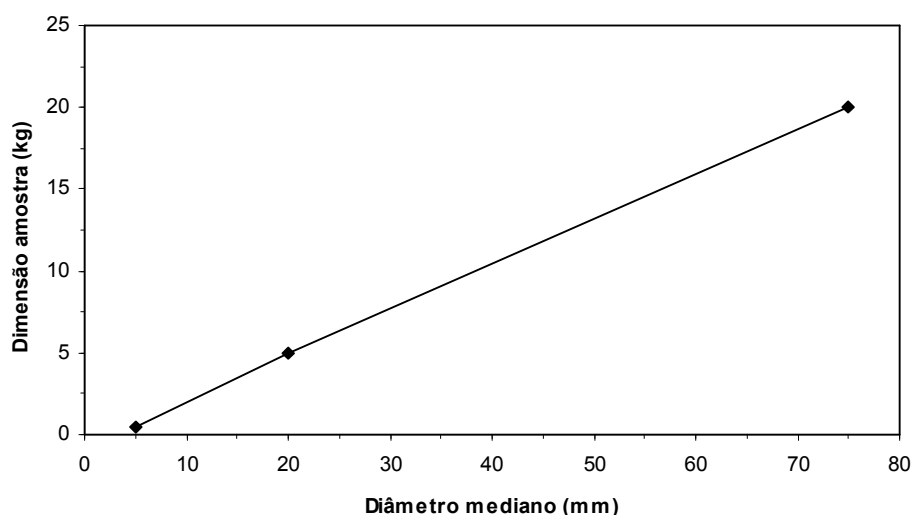


Figura 124 - Relação entre o diâmetro mediano máximo dos sedimentos e a dimensão adequada para uma amostra representativa. Os pontos de dados reflectem os três pares de valores dados em Kroetsch e Wang (2008:723).

É importante referir que houve necessariamente restrições logísticas à aplicação integral do gráfico, dado que as formações mais grosseiras incluíram por vezes clastos pontuais com diâmetros medianos máximos superiores a 80 mm, o que implicaria amostras da ordem das várias dezenas de quilogramas em ordem a manter a representatividade das diferentes classes. Nestes casos, optou-se por extrair um máximo de 20 kg de material, assumindo-se as amostras como representativas.

Imediatamente após a colheita e pesagem de cada amostra (usando um dinamómetro de tracção KERN com uma precisão de 20 g), foram separados e pesados no terreno os clastos com diâmetros medianos nas classes]32 mm-64 mm],]64 mm-128 mm],]128 mm-256 mm], e >256mm. Recorreu-se para isso a uma placa de alumínio com orifícios, construída para o efeito¹⁰⁴ usando o mesmo princípio da mesa perfurada proposta por Carvalho (2005: 129), e apresentada em utilização na Figura 125 (a). Este utensílio permitiu evitar a necessidade de transportar dezenas de quilogramas de material para o laboratório para posterior separação.

Após o transporte do restante material das amostras para o laboratório, foi usado um peneiro com uma malha metálica de 13 mm para separar os clastos entre os 13mm e os 32mm de diâmetro, pesados de seguida usando o dinamómetro. Tal como a placa perfurada, o peneiro foi construído para o efeito, sendo uma imagem apresentada na Figura 125 (b).

¹⁰⁴ Orifícios de diâmetros 32, 64, e 128 mm. A placa incluiu uma aresta com 256 mm de comprimento, em ordem a permitir detectar clastos entre 128 e 256 mm.



Figura 125 - (a) a placa perfurada em utilização no terreno; (b) peneiro usado no laboratório.

Os procedimentos descritos até este ponto permitiram definir, tendo como referência a massa total da amostra, a percentagem representada por clastos em cinco classes granulométricas: [13-32];]32-64];]64-128];]128-256]; e > 256 mm.

Tomando o material restante das amostras, procedeu-se à sua secagem no forno (70° C durante cerca de 12 horas), e ao seu quartejamento (cf. Carvalho, 2005: 135) a fim de repartir a massa total em três partes, sendo depois pesada cada uma. Destas três sub-amostras, duas foram usadas para a dispersão, respectivamente em água e dispersante, necessária ao cálculo do índice de Middleton. A terceira foi usada para a análise textural. Serão descritos primeiramente os procedimentos realizados com relação à dispersão.

À primeira parte de cada sub-amostra foi adicionada uma solução dispersante¹⁰⁵. Material e solução foram depois submetidos, num copo de alumínio, à acção rotativa de um agitador eléctrico durante cinco minutos. A solução dispersa foi depois passada por um filtro de 0,063 mm para dentro de um copo graduado, sendo assim eliminado o material acima desta dimensão (correspondendo, na escala de Wentworth, à classe das areias e superiores; Carvalho, 2005: 121). O material resultante, correspondendo ao silte e à argila, foi vazado para uma proveta graduada e deixado decantar completamente com a ajuda de algumas gotas de permanganato de potássio. Finalmente, a solução dispersante foi vazada cuidadosamente, e o material decantado colocado num filtro de papel (previamente pesado), sendo a água eliminada por sucção usando uma bomba eléctrica. O filtro com o material retido foi depois

¹⁰⁵ A solução foi obtida adicionando 35,7 g de Hexametáfosfato de Sódio e 7,49 g de Carbonato de Sódio Anidro para 1 L de água desionizada.

colocado num forno até secar completamente e pesado. Após subtração do peso referente ao próprio filtro, obteve-se assim o peso da fracção correspondente ao silte e à argila. Foi depois calculada a percentagem representada por esta fracção face ao peso inicial do material sujeito a dispersão.

O processo realizado para a segunda sub-amostra foi idêntico, à excepção do facto de que se utilizou água desionizada para dispersar o material, por oposição a uma solução dispersante. O resultado final, à semelhança do procedimento que se acabou de descrever, foi a percentagem representada conjuntamente pelo silte e a argila.

Por último, operacionalizou-se a fórmula do índice de Middleton. Os valores finais por cada amostra de material extraída são apresentados na Tabela 99, sendo os valores médios por tipo de material representados na Figura 126.

A terceira sub-amostra de cada uma das amostras iniciais foi utilizada para caracterizar a textura, pelo que se considerou em primeiro lugar a possibilidade da existência de cimentos condicionantes da objectividade das análises¹⁰⁶.

Começou-se por testar a hipótese de existência de carbonatos vertendo algumas gotas de ácido clorídrico sobre o material, não se verificando nunca qualquer reacção.

Apesar de a remoção da matéria orgânica constituir um procedimento padrão em análises de solo, optou-se por dispensá-la neste trabalho, dado que todo o material extraído dos perfis dos sistemas de ravinas constitui material originário, e portanto não sujeito a processos pedológicos (que, como foi já referido, não atingem uma profundidade superior a alguns cms nas áreas estudadas). Considerou-se que a matéria orgânica, ainda que hipoteticamente presente em quantidades ínfimas, não influencia de forma alguma o comportamento mecânico do material em análise, que constituiu o foco das análises realizadas.

¹⁰⁶ Os procedimentos relativos à eliminação de possíveis cimentos não foram realizados sobre as duas porções de cada amostra utilizadas no cálculo do índice de Middleton porque foi assumido que a possível cimentação não teve qualquer efeito sobre a relação entre valores que constitui o índice.

Tabela 99 - Fração <0,063 mm obtida usando dispersante e água desionizada por amostra, valor do Índice de Middleton resultante, e respectiva média e desvio-padrão. O significado de cada componente do código identificador de cada amostra foi já explicado na legenda da Tabela 98.

Amostra		Disperso com	Fração <0,063mm	Índice de Middleton	Média	DP
MREG1	AM1	Disp	0,13	0,87	0,85	0,02
		Água	0,11			
	AM2	Disp	0,34	0,83		
		Água	0,28			
	AM3	Disp	0,30	0,85		
		Água	0,25			
MREG2	AM1	Disp	0,17	0,75	0,89	0,13
		Água	0,13			
	AM2	Disp	0,25	1,00		
		Água	0,25			
	AM3	Disp	0,14	0,93		
		Água	0,13			
MREG3	AM1	Disp	0,12	0,90	0,86	0,11
		Água	0,11			
	AM2	Disp	0,32	0,73		
		Água	0,24			
	AM3	Disp	0,26	0,95		
		Água	0,25			
MREG4	AM1	Disp	0,99	0,96	0,93	0,06
		Água	0,96			
	AM2	Disp	0,99	0,85		
		Água	0,84			
	AM3	Disp	0,90	0,97		
		Água	0,87			
MDREG1	AM1	Disp	0,20	0,74	0,83	0,14
		Água	0,15			
	AM2	Disp	0,26	0,75		
		Água	0,19			
	AM3	Disp	0,26	0,99		
		Água	0,25			
MDREG2	AM1A	Disp	0,42	0,97	0,90	0,12
		Água	0,41			
	AM2A	Disp	0,10	0,97		
		Água	0,10			
	AM3A	Disp	0,13	0,76		
		Água	0,10			
	AM1B	Disp	0,87	0,96	0,95	0,03
		Água	0,84			
	AM2B	Disp	0,90	0,97		
		Água	0,88			
	AM3B	Disp	0,85	0,91		
		Água	0,77			
MDREG3	AM1	Disp	0,83	1,00	1,00	0
		Água	0,83			
	AM2	Disp	0,35	1,00		
		Água	0,35			
	AM3	Disp	0,56	1,00		
		Água	0,56			

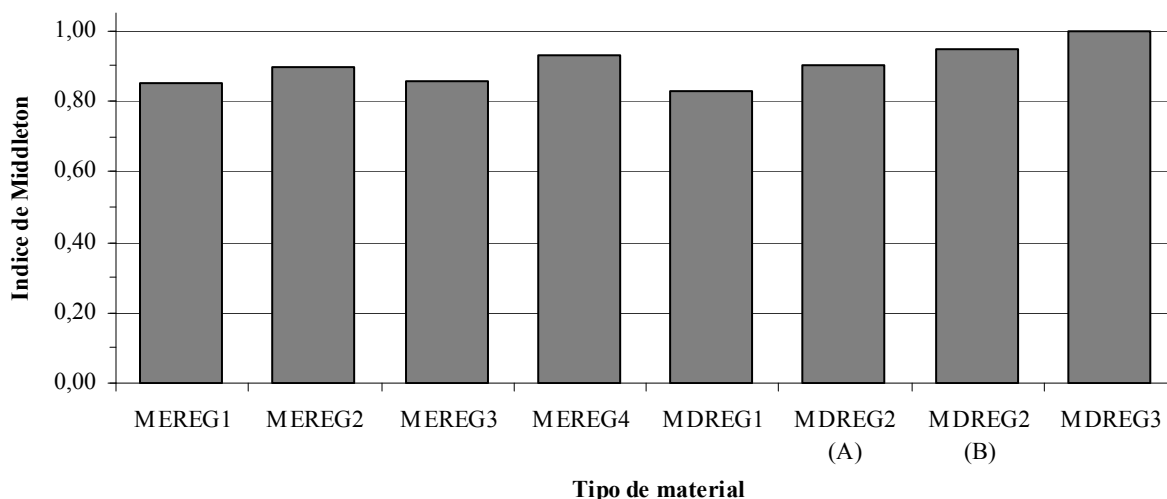


Figura 126 - Valores médios do Índice de Middleton obtidos por tipo de material, sendo cada valor a média dos três valores das amostras individuais. Notar que o segundo tipo de rególito na margem direita da ribeira de Ulme (MDREG2, correspondendo aos arenitos amarelados com intercalações argilosas e cascalhentas, cf. Tabela 98) divide-se em duas partes, correspondendo respectivamente aos sectores mais arenosos (A) e mais argilosos (B)¹⁰⁷.

Ao contrário dos carbonatos e da matéria orgânica, a presença de óxidos de ferro evidenciou-se desde uma primeira análise visual do material no terreno em função da cor deste, frequentemente variando entre diferentes tons de alaranjados e avermelhados e muitas vezes com os clastos individuais manchados de tons ferruginosos (e.g. Figura 120 (b)). Em ordem a eliminá-los, recorreu-se a uma solução de citrato, carbonato e ditionito (i.e. hidrossulfito) de sódio, mantendo-se o material na solução a uma temperatura de 80°C durante 30 minutos.

Pretendeu-se inicialmente dissolver os óxidos na solução a quente, dispersar o material em água desionizada (mais semelhante às condições naturais do que uma solução dispersante), e separar a fracção <0,063 mm usando um filtro. Esta seria, depois de decantada, colocada num filtro de papel, sujeita a sucção numa bomba, e seca no forno (exactamente como já descrito para as duas primeiras partes de cada amostra). Por oposição, a fracção acima deste valor (areias ou superior), seria seca no forno e crivada mecanicamente num agitador de peneiros. Verificou-se porém frequentemente que, após a remoção dos óxidos, a fracção fina não decantou ao longo de semanas, mesmo com a adição de permanganato de potássio, formando-se antes uma substância translúcida, viscosa e de cor esbranquiçada que, ao agregar as partículas mais finas, inviabilizou a continuação do processo. Dada a frequência com que esta

¹⁰⁷ Não se quantificou o índice de Middleton para a componente cascalhenta, assumindo-se com base na observação que a matriz é composta do mesmo material que a componente arenosa. Esta opção foi tomada também para os arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas da margem esquerda da rib^a de Ulme (MERE2 na Tabela 98).

situação se verificou e a impossibilidade logística de repetir o processo numerosas vezes, separando as duas fracções (fina e grosseira) antes da remoção dos óxidos, optou-se por eliminar a fracção fina das análises, crivando-se e pesando-se apenas a fracção grosseira, e assumindo-se que a diferença face ao valor inicial correspondeu ao silte e à argila eliminados. Apesar de não ser assim possível somar todas as fracções e comparar o resultado com o peso inicial em ordem a ter a certeza de que não se perdeu material (o procedimento padrão em análises sedimentológicas), foi ainda assim possível diferenciar em termos gerais os vários materiais analisados quanto à proporção de diferentes classes texturais. Ao mesmo tempo, esta análise foi em certa medida complementada pela separação e pesagem dos siltes e argilas levada a cabo em associação à sua dispersão em água desionizada, anteriormente descrita.

A crivagem realizada para a fracção grosseira de cada sub-amostra permitiu separar o material em 6 classes granulométricas: $\leq 0,063 \text{ mm}^{108}$;]0,063-0,125mm];]0,125mm-0,5mm];]0,5mm-2mm];]2mm-4mm], e]4mm-13mm]. Nos casos em que o rególito em análise não incluiu clastos de dimensões superiores a estas, foram apenas calculadas as percentagens representadas por cada classe face ao peso total da sub-amostra, sendo estas as proporções finais assumidas para a totalidade da amostra original. Nos restantes casos (e.g. conglomerados), porém, foi necessário assumir que a proporção representada por cada classe na sub-amostra é a mesma encontrada na fracção $\leq 13 \text{ mm}$ da amostra original extraída no campo. Partindo desta assunção, foi apenas necessário usar as proporções de cada uma das 6 classes incluídas na sub-amostra (i.e. até 13mm) para estimar o peso absoluto de cada classe granulométrica na amostra original extraída no terreno, e usar este peso junto com o peso total extraído para calcular as proporções associadas às diferentes classes. Os procedimentos são ilustrados na Figura 127, sendo de seguida dado um exemplo hipotético em ordem a tornar o procedimento mais claro.

Imagine-se que numa amostra de material muito heterométrico colhida no terreno 0,60 da massa total é constituída por material $\leq 13\text{mm}$. Ao realizar-se a análise textural acima descrita sobre uma amostra menor extraída da fracção $\leq 13\text{mm}^{109}$, constatou-se que 0,25 desta corresponde à classe 0,125mm - 0,5mm. Assumindo que a distribuição encontrada nesta porção de material caracteriza toda a fracção $\leq 13\text{mm}$ da amostra original, pode-se assumir que a classe 0,125-0,5mm representa 0,25 de 0,60 da amostra original, ou seja, $0,25 \times 0,60 = 0,15$ do total.

¹⁰⁸ Embora a fracção fina tenha sido eliminada, a crivagem revelou sempre existir ainda algum material residual, sendo a massa correspondente somada à massa do material eliminado.

¹⁰⁹ Conforme descrito, a fracção $< 13\text{mm}$ de cada amostra extraída no campo foi utilizada para obter três amostras menores, sendo duas usadas para a análise da dispersividade e a terceira para a análise textural.

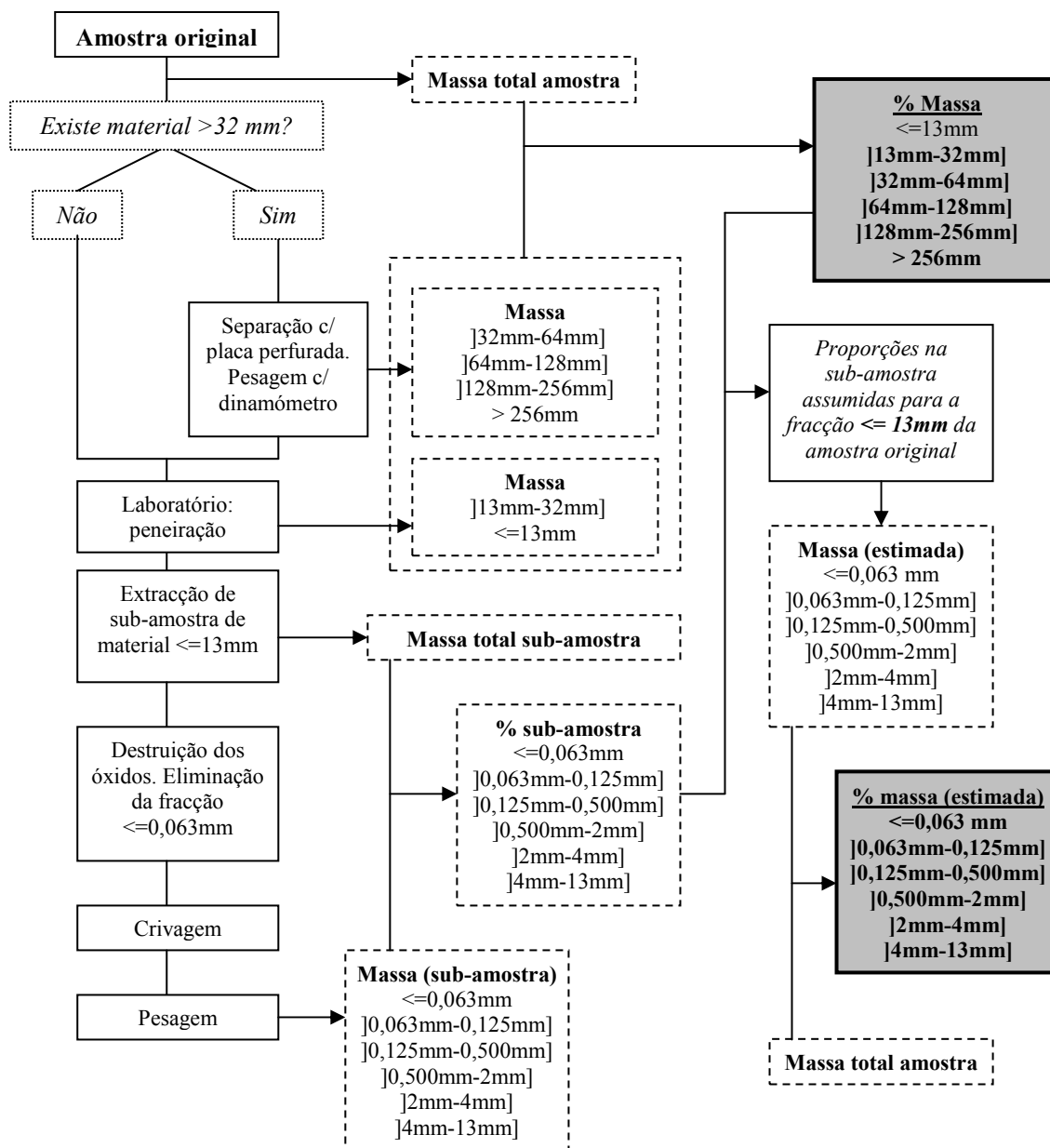


Figura 127 - Diagrama dos procedimentos levados a cabo na análise textural. As caixas de texto a tracejado indicam valores intermédios obtidos ao longo dos procedimentos. As caixas a cinzento indicam valores finais, correspondentes às proporções representadas por cada fracção na amostra original.

Os resultados por amostra e os valores médios por tipo de rególito são apresentados separadamente para as margens esquerda e direita da rib^a de Ulme nas Tabelas 100 e 101. A representação gráfica da importância média das várias classes granulométricas por tipo de rególito é dada nas Figuras 128 e 129.

Analisando os resultados associados ao Índice de dispersão de Middleton, é notório que o valor mínimo obtido¹¹⁰ foi de 0,83, indicando que todos os materiais onde evoluem os sistemas de ravinas em estudo apresentam argilas com forte dispersividade e seriam, de acordo com Middleton (1930) considerados muito erodíveis (recorde-se que o autor definiu um limiar de 0,15 para definir um material como erodível). Estes valores são semelhantes aos descritos por Vandekerckhove *et al.* (2000b) para duas áreas degradadas por ravinas de grandes dimensões no SE de Espanha (mínimo 0,82; máximo 1: op.cit: 42). A dispersividade das argilas é identificada por Gallart *et al.* (2002:304) como um factor relevante na dinâmica erosiva de *badlands* em ambientes mediterrânicos, já que os materiais, ao humedecerem e deixarem de estar estruturados, tornam-se muito mais facilmente removíveis pela acção erosiva da chuva e do escoamento.

Tabela 100 - Resultados das análises texturais para os tipos de rególito definidos para a margem esquerda da ribeira de Ulme. As três classes dominantes em cada amostra foram salientadas a negrito e itálico.

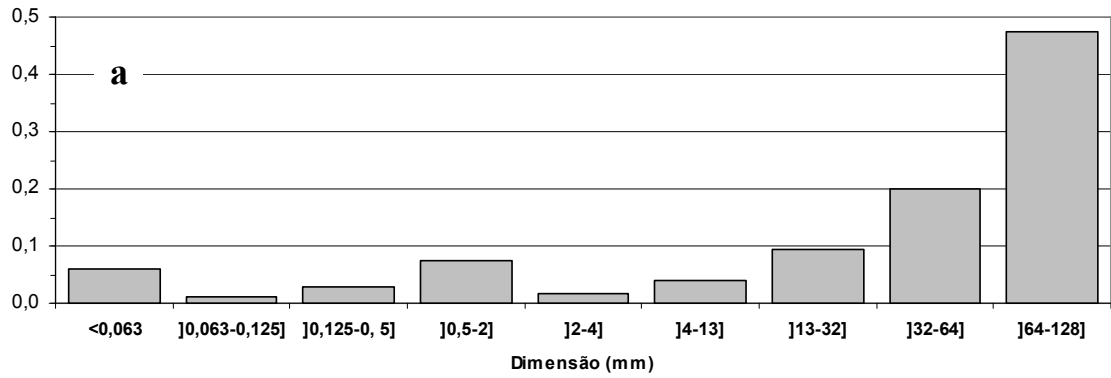
Tipo de rególito	Amostra	Peso (g)	Crivagem						13-32 mm	32-64 mm	64-128 mm	128-256 mm	>256 mm	Soma
			<0,063 mm (Φ>4)	0,063 - 0,125 mm (Φ4)	0,125 - 0,5 mm (Φ3)	0,5-2 mm (Φ1)	2-4 mm (Φ-1)	4-13 mm (Φ-2)						
MERE1	AM1 (F02)	26300	0,03	0,01	0,03	0,07	0,02	0,04	0,11	0,27	0,41	0	0	1,000
	AM2 (F19)	22450	0,07	0,01	0,03	0,09	0,02	0,05	0,08	0,17	0,49	0	0	1,000
	AM3 (F30)	20200	0,07	0,02	0,03	0,06	0,02	0,03	0,09	0,17	0,52	0	0	1,000
	Valores médios		0,06	0,01	0,03	0,07	0,02	0,04	0,09	0,20	0,47	0	0	
MERE2	AM1 (F02)	95,96	0,20	0,04	0,13	0,53	0,08	0,02	0	0	0	0	0	0,998
	AM2 (F19)	127,65	0,27	0,04	0,19	0,38	0,08	0,03	0	0	0	0	0	0,998
	AM3 (F30)	119,65	0,15	0,02	0,07	0,47	0,23	0,05	0	0	0	0	0	0,999
	Valores médios		0,21	0,04	0,13	0,46	0,13	0,03	0	0	0	0	0	
MERE2	AM1B (F02)	14830	0,06	0,01	0,04	0,15	0,02	0	0,13	0,25	0,33	0	0	0,994
	AM2B (F19)	17520	0,06	0,01	0,05	0,09	0,02	0,01	0,08	0,23	0,45	0	0	1,000
	AM3B (F30)	20060	0,04	0,01	0,02	0,13	0,06	0,01	0,14	0,32	0,26	0	0	1,000
	Valores médios		0,05	0,01	0,03	0,13	0,04	0,01	0,12	0,27	0,35	0	0	
MERE3	AM1 (F01)	116,31	0,16	0,03	0,21	0,49	0,08	0,03	0	0	0	0	0	0,999
	AM2 (F16)	100,11	0,25	0,14	0,31	0,24	0,04	0	0	0	0	0	0	0,999
	AM3 (F30)	117,64	0,29	0,13	0,20	0,22	0,07	0,05	0,05	0	0	0	0	0,999
	Valores médios		0,24	0,10	0,24	0,32	0,06	0,03	0,02	0	0	0	0	
MERE4	AM1 (F13)	36,9	0,94	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,999
	AM2 (F12)	34,27	0,94	0,04	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
	AM3 (F29)	37,71	0,90	0,05	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0,987
	Valores médios		0,93	0,04	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	

¹¹⁰ Este valor é o valor médio mais baixo para cada conjunto de três amostras usado para caracterizar cada material. Se considerarmos os resultados obtidos para as amostras individuais, o valor mínimo foi de 0,73 (MERE3AM2).

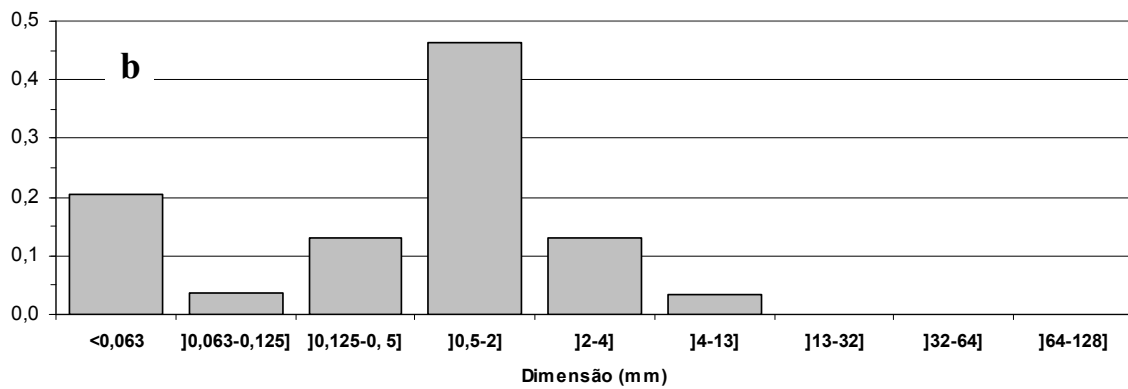
Tabela 101 - Resultados das análises texturais para os tipos de rególito definidos para a margem direita da ribeira de Ulme. As três classes granulométricas dominantes em cada amostra foram salientadas a negrito e itálico. Em MDREG3AM3 (F24), observou-se que existem duas classes granulométricas exactamente com a mesma relevância (0,005), ocupando o terceiro lugar. Optou-se por salientar ambas.

Tipo de rególito	Amostra	Peso (g)	Crivagem										Soma	
			<0,063 mm (Φ>4)	0,063 - 0,125 mm (Φ4)	0,125 - 0,5mm (Φ3)	0,5-2 mm (Φ1)	2-4 mm (Φ-1)	4-13 mm (Φ-2)	13-32 mm	32-64 mm	64-128 mm	128-256 mm		>256 mm
MDREG1	AM1 (F27)	102,25	<i>0,17</i>	0,02	<i>0,10</i>	<i>0,60</i>	0,09	0,02	0	0	0	0	0	0,999
	AM2 (F24)	88,91	<i>0,24</i>	0,13	<i>0,41</i>	<i>0,22</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,994
	AM3 (F07)	110,14	<i>0,29</i>	0,03	<i>0,47</i>	<i>0,21</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,999
	Valores médios		0,23	0,06	0,33	0,34	0,03	0,01	0	0	0	0	0	
MDREG2	AM1 (F10)	106,52	<i>0,48</i>	0,08	<i>0,18</i>	<i>0,19</i>	0,05	0,01	0	0	0	0	0	0,999
	AM2 (F05)	168,69	<i>0,13</i>	0,04	0,10	<i>0,45</i>	<i>0,17</i>	0,09	0,02	0	0	0	0	0,999
	AM3 (F08)	195,46	<i>0,15</i>	0,02	0,07	<i>0,37</i>	<i>0,26</i>	0,12	0	0	0	0	0	0,999
	Valores médios		0,26	0,05	0,12	0,34	0,16	0,08	0,01	0	0	0	0	
MDREG2	AM1B (F10)	61,81	<i>0,87</i>	0,03	<i>0,06</i>	<i>0,03</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,998
	AM2B (F05)	38,58	<i>0,95</i>	<i>0,03</i>	0,00	<i>0,01</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,999
	AM3B (F08)	88,19	<i>0,87</i>	<i>0,09</i>	<i>0,03</i>	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,999
	Valores médios		0,90	0,05	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	
MDREG2	AM1C (F10)	14460	<i>0,12</i>	0,02	0,04	0,05	0,01	0	0,07	<i>0,51</i>	<i>0,17</i>	0	0	1,000
	AM2C (F05)	6500	0,08	0,02	0,06	<i>0,25</i>	0,09	0,05	0,09	<i>0,26</i>	<i>0,10</i>	0	0	1,000
	AM3C (F08)	14500	0,04	0,01	0,02	<i>0,09</i>	0,07	0,03	0,08	<i>0,36</i>	<i>0,31</i>	0	0	1,000
	Valores médios		0,08	0,02	0,04	0,13	0,06	0,03	0,08	0,38	0,19	0	0	
MDREG3	AM1 (F03)	51,8	<i>0,94</i>	<i>0,04</i>	<i>0,01</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,999
	AM2 (F26)	67,13	<i>0,48</i>	<i>0,17</i>	<i>0,35</i>	0,01	0	0	0	0	0	0	0	1,000
	AM3 (F24)	54,49	<i>0,68</i>	<i>0,31</i>	<i>0,005</i>	<i>0,005</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,998
	Valores médios		0,70	0,17	0,12	0,01	0	0	0	0	0	0	0	

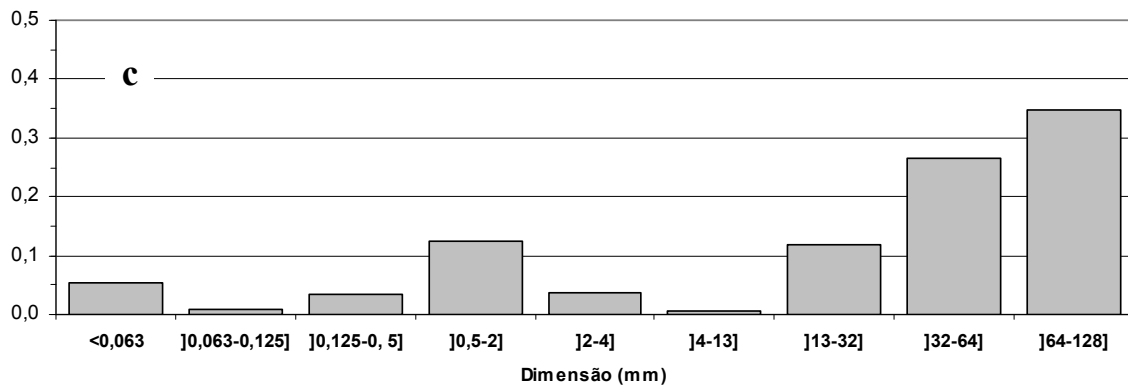
MEREG1 - Conglomerados compactos



MEREG2 - Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas (arenitos)



MEREG2 - Arenitos alaranjados com intercalações cascalhentas (intercalações)



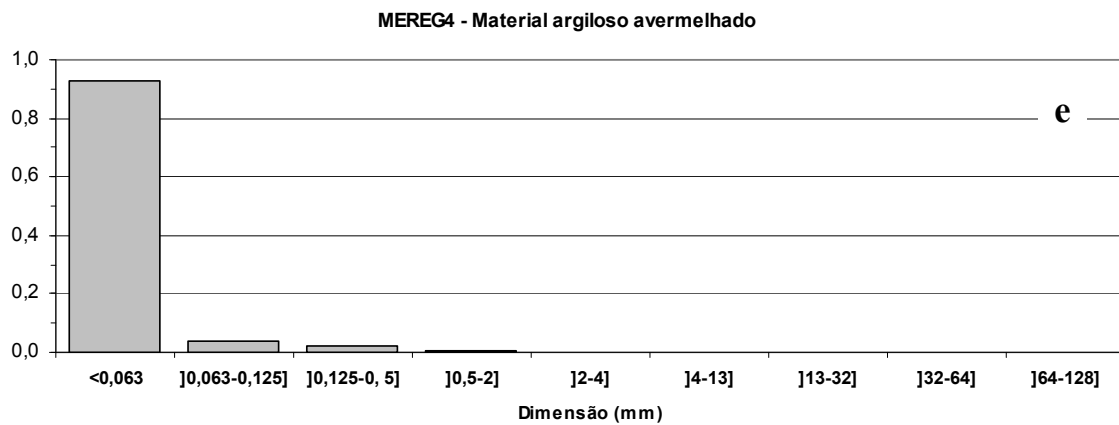
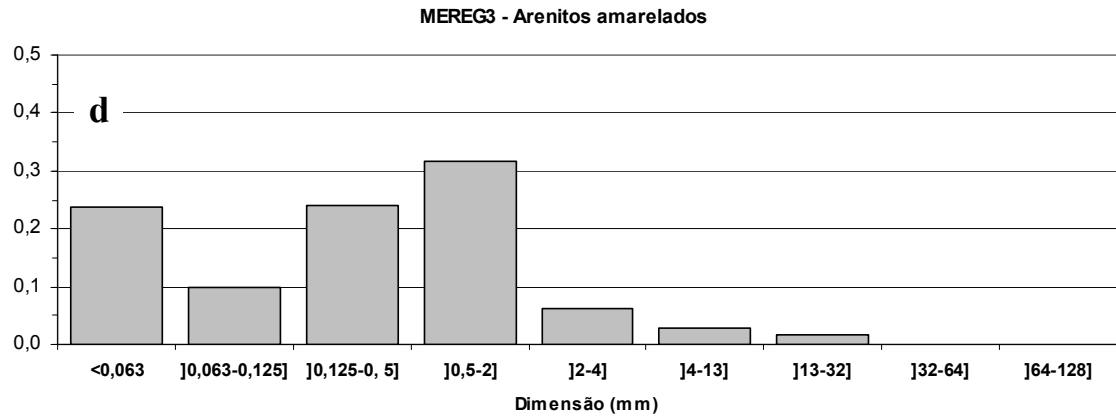
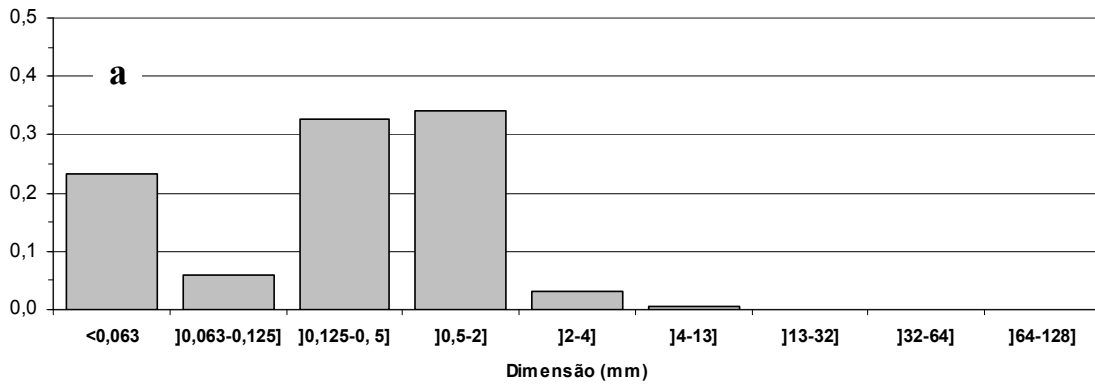
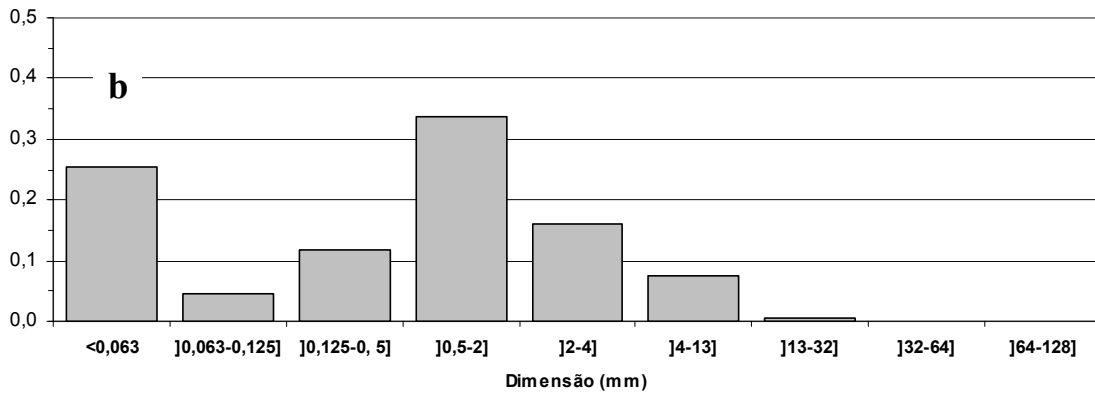


Figura 128 - Percentagem representada por cada classe granulométrica adoptada nos tipos de rególito da margem esquerda da rib^a de Ulme. Valores apresentados para cada tipo de rególito correspondem às médias dos valores obtidos para as três amostras respectivas (cf. Tabela 100). Notar a escala diferente no eixo das ordenadas em (e).

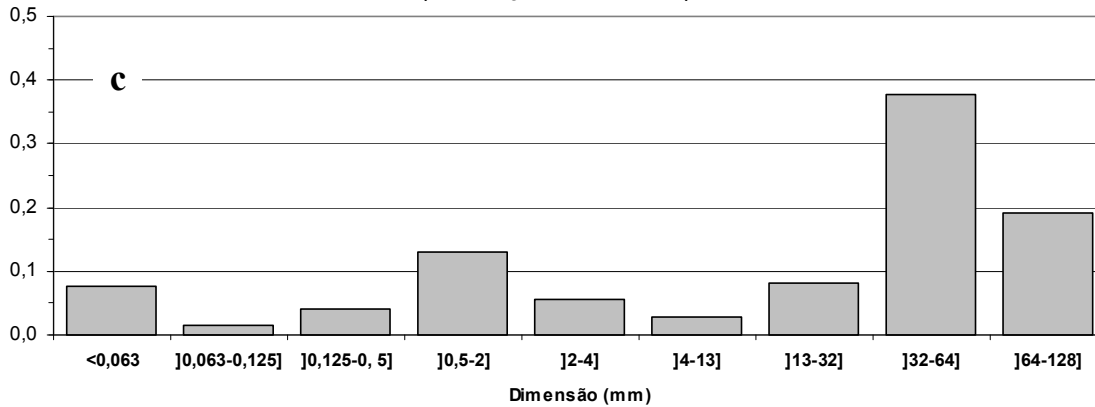
MDREG1 - Arenitos alaranjados a avermelhados, com algum cascalho



MDREG2 - Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (componente mais arenosa)



MDREG2 - Arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas (intercalações cascalhentas)



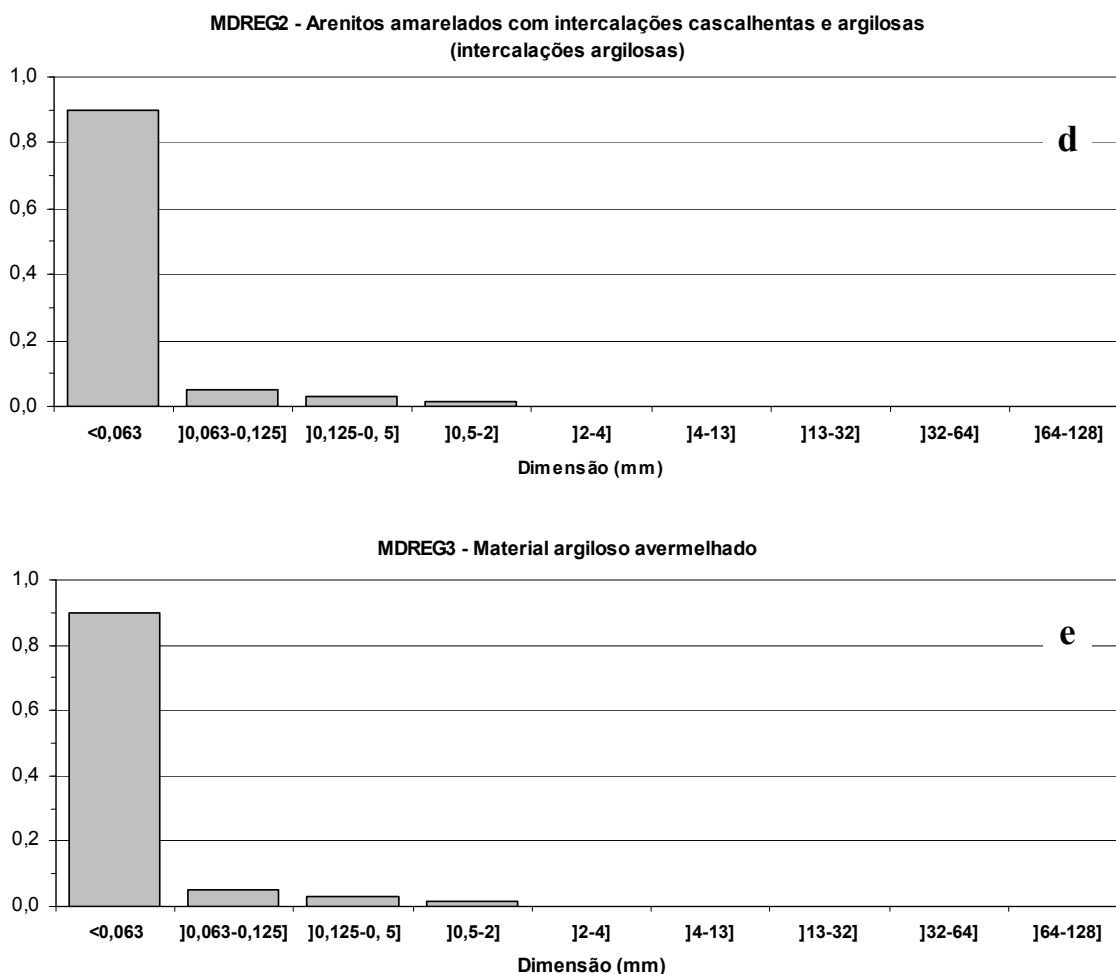


Figura 129 - Percentagem representada por cada classe granulométrica adoptada nos tipos de rególito da margem direita da rib^a de Ulme. Valores apresentados para cada tipo de rególito correspondem às médias dos valores obtidos para as três amostras respectivas (cf. Tabela 101). Notar a escala diferente no eixo das ordenadas em (d) e (e), necessária devido à elevada proporção de silte e argila.

4.5. Relações Morfologia - Factores de controlo

Pretendeu-se investigar as possíveis relações entre a morfologia dos sistemas de ravinas, já caracterizada em detalhe e simplificada na forma de seis componentes principais (vd. III.4.1.8.2), e os potenciais factores de controlo definidos. Esta análise foi realizada em duas etapas, em função das naturezas contrastantes dos dados relativos aos factores de controlo: as variáveis quantitativas foram relacionadas com as componentes principais com recurso a regressão linear bivariada, sendo as relações significativas analisadas em maior pormenor através do ajustamento de funções não-lineares (à imagem do procedimento já adoptado para a análise das relações entre propriedades morfológicas no Capítulo III.4.1.8.1). Estes factores

incluiram a área de drenagem medida nas desembocaduras das formas e as características da topografia pré-erosão.

Numa segunda etapa, a litologia foi considerada separadamente em função da sua natureza qualitativa, sendo relacionada com as Componentes Principais com recurso a análise discriminante. Esta mesma técnica foi já adoptada para relacionar os processos de ravinamento com as componentes principais em III.4.3.

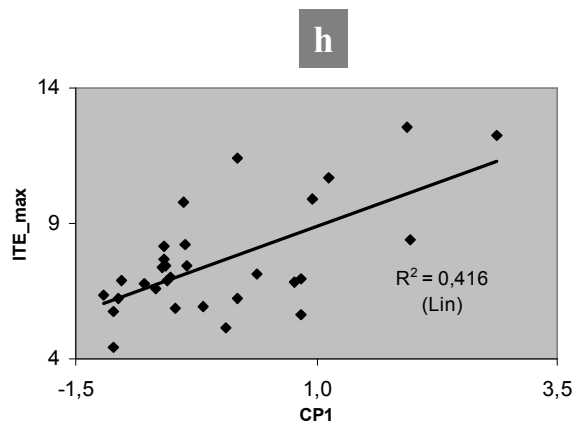
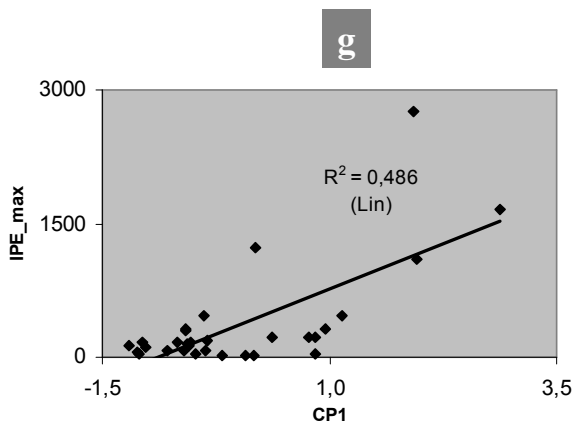
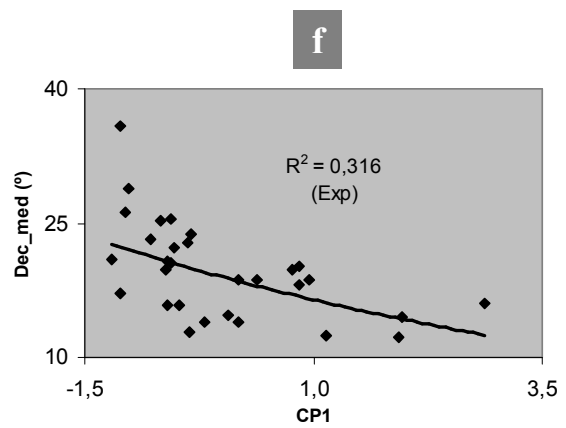
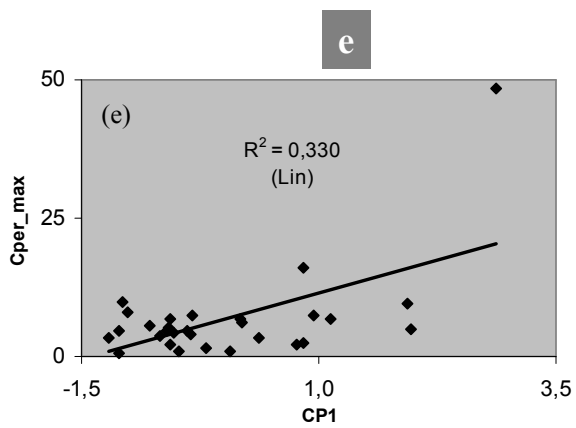
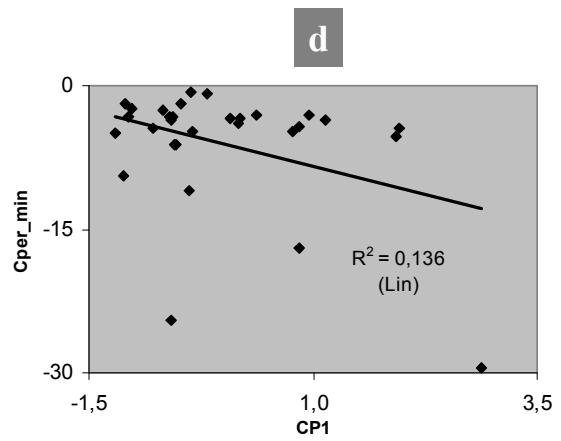
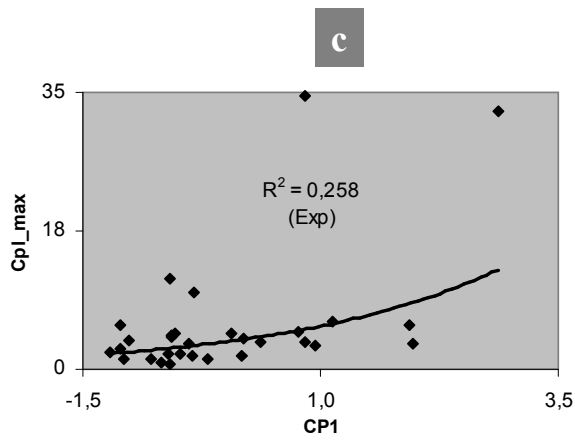
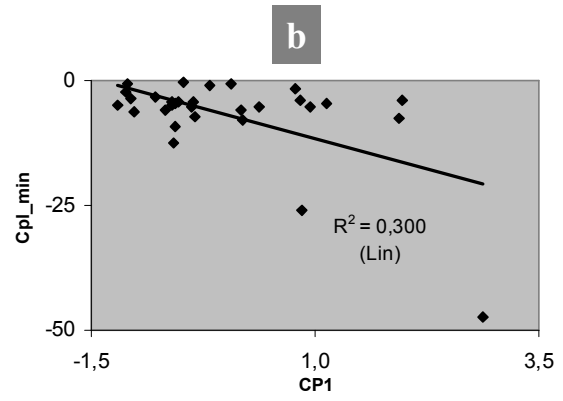
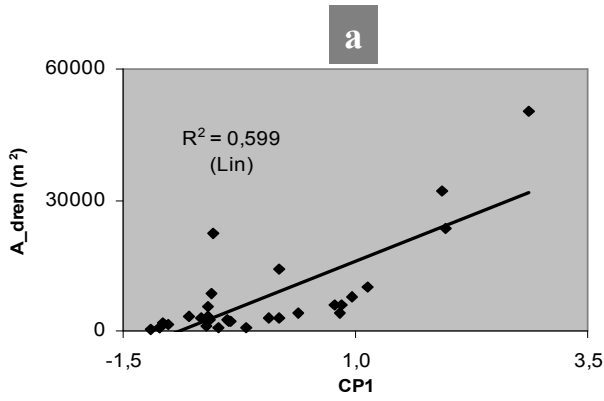
4.5.1. Morfologia e topografia pré-erosão: Regressão Linear Bivariada

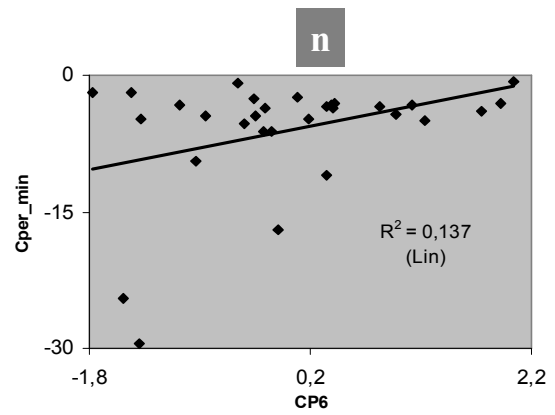
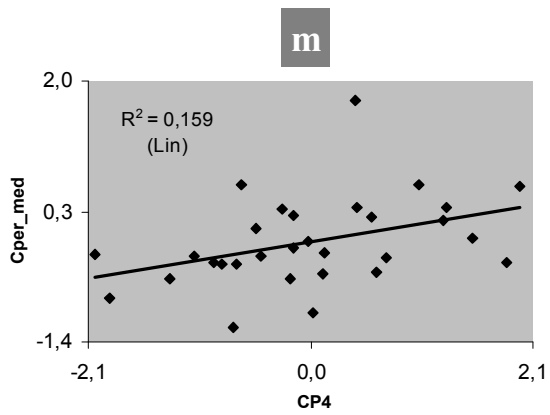
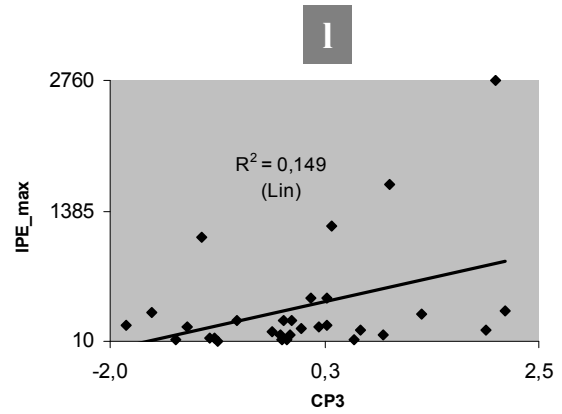
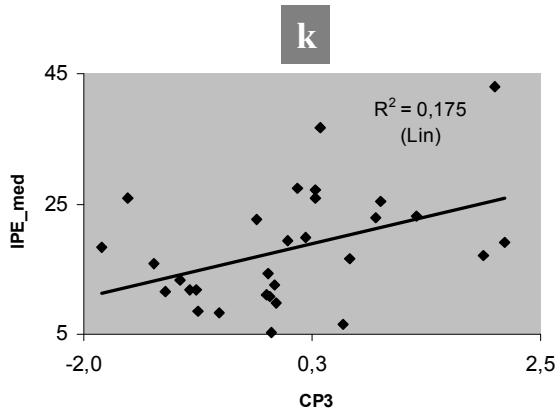
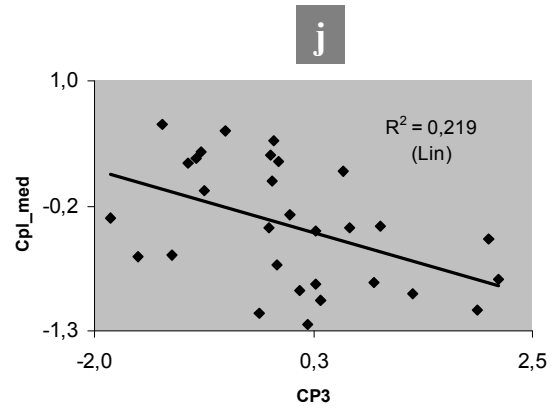
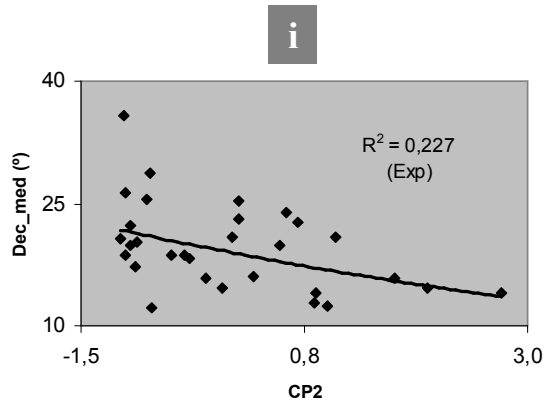
Utilizou-se o SPSS 15.0 para correr uma análise de regressão entre as seis componentes principais (CP) e os 13 possíveis factores de controlo de natureza quantitativa. Os coeficientes de correlação resultantes e as respectivas margens de erro são apresentados na Tabela 102. Tal como já realizado na análise das relações entre indicadores morfológicos em III.4.1.8.1, as relações significativas ($p < 0,05$) foram depois analisadas com maior pormenor através do ajustamento de funções não-lineares usando o Microsoft Excel, com vista a aferir até que ponto podem ser mais adequadamente descritas. Os resultados são apresentados graficamente na Figura 130, sendo mantidas as funções lineares sempre que estas permitiram obter os coeficientes de determinação mais elevados.

A análise das figuras torna claro que a quase totalidade das relações é mais adequadamente descrita por funções lineares. Ao mesmo tempo, é notória a dispersão que se verifica na grande maioria das relações bivariadas, confirmada pelos muitos coeficientes de correlação relativamente reduzidos na Tabela 102. As excepções verificam-se apenas em relação à CP1, com três coeficientes de correlação acima de 0,6. As correlações relativas a cada CP serão analisadas em separado.

Tabela 102 - Coeficientes de correlação de Pearson entre as seis Componentes Principais e os 13 possíveis factores de controlo quantitativos. O grau de significação (*p*) é apresentado abaixo de cada coeficiente, em itálico. Valores a negrito identificam coeficientes considerados significativos (*p*<0,05). *A_dren* - Área de drenagem na desembocadura (m²); *Cpl_min* - curvatura planar mínima; *Cpl_med* - curvatura planar média; *Cpl_max* - curvatura planar máxima; *Cper_min* - curvatura de perfil mínima (adimensional); *Cper_med* - curvatura de perfil média; *Cper_max* - curvatura de perfil máxima; *Dec_max* - declive máximo (°); *Dec_med* - declive médio; *IPE_med* - Índice de Potência do Escoamento médio (adimensional); *IPE_max* - Índice de Potência do Escoamento máximo; *ITE_med* - Índice Topográfico de Encharcamento médio (adimensional); *ITE_max* - Índice Topográfico de Encharcamento máximo.

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
A_dren	0,774 <i>0,000</i>	-0,156 <i>0,411</i>	0,210 <i>0,265</i>	-0,030 <i>0,873</i>	0,060 <i>0,753</i>	-0,244 <i>0,194</i>
Cpl_min	-0,548 <i>0,002</i>	0,087 <i>0,649</i>	-0,276 <i>0,140</i>	-0,034 <i>0,859</i>	-0,106 <i>0,577</i>	0,222 <i>0,239</i>
Cpl_med	0,302 <i>0,104</i>	0,146 <i>0,440</i>	-0,468 0,009	0,144 <i>0,449</i>	-0,091 <i>0,634</i>	-0,116 <i>0,540</i>
Cpl_max	0,505 <i>0,004</i>	-0,096 <i>0,614</i>	0,103 <i>0,590</i>	0,121 <i>0,523</i>	0,144 <i>0,448</i>	-0,288 <i>0,123</i>
Cper_min	-0,369 <i>0,045</i>	0,005 <i>0,977</i>	-0,360 0,050	-0,052 <i>0,786</i>	0,060 <i>0,752</i>	0,370 0,044
Cper_med	-0,001 <i>0,997</i>	0,063 <i>0,742</i>	-0,270 <i>0,149</i>	0,400 0,029	-0,025 <i>0,896</i>	0,163 <i>0,390</i>
Cper_max	0,574 <i>0,001</i>	-0,096 <i>0,615</i>	0,227 <i>0,228</i>	0,050 <i>0,795</i>	0,176 <i>0,353</i>	-0,235 <i>0,211</i>
Dec_max	0,207 <i>0,273</i>	-0,341 <i>0,065</i>	0,191 <i>0,313</i>	0,133 <i>0,482</i>	0,050 <i>0,793</i>	-0,382 0,037
Dec_med	-0,551 <i>0,002</i>	-0,459 0,011	-0,142 <i>0,455</i>	0,009 <i>0,961</i>	0,063 <i>0,739</i>	-0,226 <i>0,229</i>
IPE_med	0,203 <i>0,281</i>	-0,269 <i>0,150</i>	0,418 0,022	0,132 <i>0,486</i>	0,193 <i>0,306</i>	-0,176 <i>0,353</i>
IPE_max	0,697 <i>0,000</i>	-0,160 <i>0,399</i>	0,386 0,035	0,047 <i>0,806</i>	0,207 <i>0,273</i>	-0,198 <i>0,295</i>
ITE_med	0,346 <i>0,061</i>	0,293 <i>0,116</i>	0,126 <i>0,508</i>	0,005 <i>0,981</i>	0,041 <i>0,829</i>	0,085 <i>0,656</i>
ITE_max	0,645 <i>0,000</i>	-0,082 <i>0,668</i>	0,330 <i>0,075</i>	0,111 <i>0,559</i>	-0,027 <i>0,889</i>	0,003 <i>0,987</i>





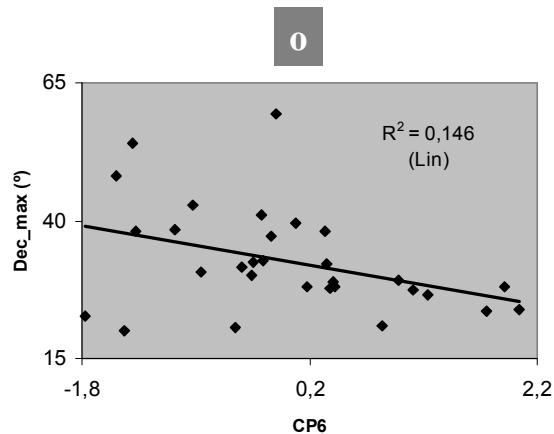


Figura 130 - Gráficos de dispersão representando cada uma das relações bivariadas estatisticamente significativas (cf. Tabela 102). As linhas de tendência descrevem as funções ajustadas com coeficiente de determinação mais elevado, sendo estes valores apresentados juntamente com o tipo de função associado. *Lin* - Linear; *Exp* - Exponencial.

A **componente 1** (CP1) representa simultaneamente as dimensões dos sistemas de ravinas (área, perímetro, largura, profundidade, comprimento e volume), a sinuosidade do seu perímetro e a suavização do perfil longitudinal. É de longe a que apresenta maior número de correlações significativas. Destas, as correlações positivas mais fortes verificaram-se em relação à área de drenagem na desembocadura das formas (*A_dren*) e aos valores máximos dos dois índices topográficos utilizados (*IPE_max* e *ITE_max*) (Figura 130 (a), (g) e (h)). Dado que a área de drenagem é uma componente fundamental de ambos os índices (juntamente com o declive), é expectável que as relações da CP1 com estas três variáveis sejam algo semelhantes. Notório, porém, é o facto de não ocorrerem correlações significativas face aos valores médios dos dois índices (*ITE_med* e *IPE_med*), reflectindo tendencialmente os valores na superfície correspondente à generalidade de cada sistema de ravinas, mas apenas face aos valores máximos, caracterizando especificamente as desembocaduras. Este resultado, assumindo que as formas evoluíram regressivamente a partir de uma origem no local da actual desembocadura, sugere que a topografia nos sectores de iniciação das formas teve, no seu desenvolvimento, um papel predominante em relação à topografia para onde estas se viriam progressivamente a expandir.

No que concerne à curvatura topográfica, a CP1 mostrou correlações positivas com as curvaturas planares e de perfil máximas (*Cpl_max* e *Cper_max*) (Figura 130 - (c), (e)), e correlações negativas com os valores mínimos (*Cpl_min* e *Cper_min*) (Figura 130 - (b), (d)), apesar de uma destas correlações ser muito fraca (*Cpl_min*: $r = -0,369$). Estes resultados indicam uma associação directa entre dimensões das formas e contraste em termos de curvaturas, e não parecem traduzir uma relação de controlo por parte da topografia. Antes,

parecem traduzir o facto de que as formas de maiores dimensões abrangem áreas mais extensas, onde a probabilidade de ocorrerem valores de curvatura mais contrastantes é mais elevada¹¹¹.

Finalmente, a CP1 apresenta uma relação inversa com o declive médio (*Dec_med*; Figura 130 - (f)), permitindo associar as formas de maiores dimensões a uma topografia relativamente suave. Esta relação é semelhante àquela observada com relação às 90 formas foto-interpretadas (Vd. III.3.2; Figura 76 (g) e (h)), sugerindo igualmente que as formas de maiores dimensões se tenderam a expandir para áreas cuja topografia promoveu a infiltração, por oposição a um escoamento superficial erosivo¹¹².

A **componente 2**, representando a suavização dos perfis transversais das formas e do declive nas cabeceiras e a superficialidade do entalhe, apresenta uma correlação negativa significativa exclusivamente com o declive médio (*Dec_med*; Figura 130 (i)), tal como foi já descrito para a CP1. Este resultado mostra que, tal como visto para as formas de maiores dimensões, as formas com perfis transversais mais suavizados e cabeceiras menos declivosas tendem a evoluir sobre vertentes relativamente suaves. Dada a associação entre declives suaves e infiltração do escoamento (por oposição à sua aceleração e acção erosiva superficial), este resultado sugere que, nas bacias em estudo, a ocorrência de movimentos de massa promovidos pela infiltração (provocando a expansão lateral das paredes e a suavização dos perfis, bem como os colapsos nas cabeceiras) tem um papel relevante na evolução morfológica dos complexos de ravinas.

A **componente 3**, traduzindo o grau de alongamento de cada forma (i.e. a razão comprimento/largura média) e o grau de suavização do declive na cabeceira, apresenta correlações positivas com os valores médios e máximos do Índice de Potência do Escoamento (*IPE*) (Figura 130 - (k) e (l)) e uma relação negativa com a curvatura planar média (*CPL_med*; Figura 130 - (j)). Estas três relações parecem indicar uma associação entre o desenvolvimento de formas alongadas de cabeceiras relativamente suaves e uma topografia promotora de escoamento superficial erosivo. A relevância do escoamento superficial, por oposição ao escoamento sub-superficial, é indicada pela importância do IPE, não existindo correlações com ITE. O facto de se ter encontrado correlação face a *IPE_med* permite associar o escoamento erosivo à generalidade da topografia onde as formas evoluíram e não apenas à

¹¹¹ Por oposição, uma associação aos valores médios das duas curvaturas indicaria uma relação directa entre uma dada forma de vertente (e.g. mais côncava em termos planares) e sistemas de ravinas de maiores dimensões.

¹¹² Notar que esta noção está de acordo com o facto de o aumento das dimensões se correlacionar positivamente com um aumento da sinuosidade, aqui tido como um indicador da ocorrência de movimentos de massa ao longo do perímetro das formas. Esta relação já foi observada com relação às 90 formas foto-interpretadas em III.3.2.

desembocadura. Ao mesmo tempo, a relação negativa entre a CP3 e *CPL_med* mostra que valores elevados da primeira estão associados a vertentes mais côncavas em termos planares, e portanto promotoras da concentração do escoamento. Em consequência, será de esperar um recuo mais dinâmico da cabeceira, originando a morfologia relativamente alongada descrita pela CP3. Dado que este recuo parece estar relacionado essencialmente com o escoamento superficial (tal como indicado pela correlação com IPE), os declives relativamente suaves nas cabeceiras serão aqui presumivelmente o resultado da erosão hídrica continuada neste sector, em oposição à ocorrência de movimentos de massa que seria sinalizada por correlações negativas entre CP3 e o declive da topografia antecedente, ou positivas face ao Índice Topográfico de Encharcamento.

A **componente 4**, indicadora de formas com elevado alargamento nos sectores mais a montante (i.e. mais próximos da cabeceira) face aos sectores próximos da desembocadura e relativamente alongadas, mostrou estar positivamente associada de forma significativa apenas à curvatura de perfil média (*Cper_med*; Figura 130 (m)), mostrando que as formas com um desenvolvimento marcado pelo alargamento mais intenso dos sectores de cabeceira tendem a ocorrer em vertentes relativamente côncavas em termos longitudinais. Dada a relação entre concavidade de perfil e a desaceleração do escoamento, promotora da infiltração e já considerada em III.2.5, este resultado parece indicar um papel relevante por parte dos movimentos de massa, potenciados por um maior teor de água no rególito e levando à expansão lateral dos sectores dos complexos de ravinas mais a montante.

Embora não tenham sido observadas quaisquer associações entre potenciais factores de controlo e a CP 5, a **componente 6** apresenta duas correlações significativas. Esta componente descreve unicamente o grau de concavidade do perfil longitudinal dos sistemas de ravinas, correlacionando-se positivamente com a curvatura de perfil mínima (*Cper_min*) e negativamente com o declive máximo (*Dec_max*) (Figura 130 (n) e (o)). Estas relações sugerem uma associação entre sistemas de ravinas com perfis longitudinais côncavos e vertentes marcadamente côncavas¹¹³ e de declives muito reduzidos.

Do ponto de vista dos processos físicos, a concavidade das vertentes e os declives suaves são indicadores de tendência para a desaceleração do escoamento e respectiva infiltração. Tal como já considerado, estes factores tendem a promover um elevado teor de água no rególito e a ocorrência de movimentos de massa. Neste sentido, as relações encontradas face à CP 6 sugerem que os colapsos nas cabeceiras associados à regressão das formas serão, nestas

¹¹³ Notar que valores negativos de curvatura de perfil indicam uma superfície convexa, e valores positivos uma superfície côncava.

condições topográficas, acompanhados pela manutenção de cabeceiras declivosas, promovendo um perfil longitudinal côncavo. É de notar porém que estas correlações, embora significativas, são particularmente fracas (0,370 e 0,382), tal como a elevada dispersão nos gráficos mostra. A explicação sugerida será portanto muito geral, existindo nítidamente outros factores a controlar o grau de concavidade dos sistemas de ravinas.

4.5.2. Morfologia e Litologia: Análise Discriminante

Após a consideração das relações entre os factores de natureza quantitativa e a morfologia, centrou-se a atenção no único factor de natureza qualitativa: o contexto litológico em que teve lugar o surgimento e evolução das formas em estudo. Procurou-se averiguar até que ponto as características morfológicas dos complexos de ravinas (expressas na forma de seis componentes principais) permitem diferenciar os respectivos contextos litológicos, assumindo-se um resultado positivo como um forte indicador de que a litologia constitui um factor relevante na evolução das formas.

À imagem da metodologia já descrita em III.4.3 no contexto das relações morfologia-processos, recorreu-se uma vez mais à análise discriminante usando o SPSS 15.0. A apresentação desta técnica, bem como dos seus objectivos e pressupostos, foi já feita no capítulo acima referido, pelo que não será aqui repetida. De igual forma, não será feita referência à validação de dois dos pressupostos associados às variáveis independentes (i.e. as seis componentes principais): proveniência de uma população normal multivariada e inexistência de correlações lineares entre variáveis¹¹⁴. Estes já foram validados, mantendo-se os resultados válidos.

Conforme a Tabela 97 permite observar, foram individualizados doze perfis litológicos distintos para as 30 formas em análise. Estes foram diferenciados de acordo com dois critérios: (1) foram levadas em conta todas as formações associadas ao perfil de cada forma¹¹⁵, e (2) foi assumido que formações diferentes exercem efeitos distintos, mesmo que sejam compostas por materiais em grande parte semelhantes¹¹⁶. Embora a classificação obtida seja a menos generalizada possível, estes dois critérios são necessariamente questionáveis face aos

¹¹⁴ O terceiro pressuposto é o da homogeneidade das matrizes de variância/covariância de cada grupo.

¹¹⁵ A título de exemplo, assumiu-se que um perfil constituído exclusivamente por *arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas* (perfil E3) terá exercido um efeito distinto de um perfil onde esta mesma formação se sobrepõe a *arenitos amarelados* (E6).

¹¹⁶ Como exemplo, o *material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada* (perfil E4), ocorrendo na margem esquerda, foi assumido como distinto do *material vermelho relativamente argiloso* (perfil D5) da margem direita.

objectivos desta parte do trabalho, designadamente, diferenciar contextos litológicos da forma mais relevante para a evolução dos complexos de ravinas.

Se se considerar o desenvolvimento destas formas, afigura-se natural que a formação mais superficial (i.e. no topo do perfil) adquira ao longo do tempo um papel de maior relevância. Afinal, esta formação estará associada à evolução da forma desde o início, exercendo ao longo de todo o seu desenvolvimento controlo sobre a(s) cabeceira(s) e as paredes. Em contraste, as formações subjacentes só terão algum papel a partir do ponto em que o entalhe as atinja. Será portanto de esperar que formações progressivamente inferiores no perfil tenham uma relevância progressivamente menor face à totalidade do percurso evolutivo das formas.

Em paralelo, é natural que formações distintas mas com características texturais semelhantes tenham comportamentos mecânicos semelhantes. Neste sentido, seria redundante diferenciá-las na definição dos vários perfis.

Em ordem a lidar com as incertezas inerentes aos dois critérios de definição dos perfis litológicos acima definidos, levou-se a cabo um conjunto de análises com vista a testar as combinações possibilitadas por diferentes hipóteses teóricas de partida:

(1) Todas as formações ocorrentes nos perfis das formas são relevantes na definição de perfis gerais *vs.* só a formação de topo é relevante.

(2) Formações diferentes mas texturalmente semelhantes são distinguidas *vs.* são consideradas equivalentes.

Dado que cada um dos dois critérios possui duas opções possíveis, testaram-se assim quatro possibilidades de classificação de perfis, abaixo consideradas em separado.

Por último, foram testadas duas classificações adicionais com um nível máximo de generalização. De forma a averiguar a possibilidade de o controlo sobre a morfologia ser exercido em termos de grandes diferenças texturais, por oposição a diferenças mais subtis como nas restantes classificações (e.g. arenitos *vs.* arenitos com intercalações), optou-se por agrupar litologias em função das principais componentes texturais, definindo apenas três tipos: conglomerados, arenitos e material relativamente argiloso. Tal como nas análises anteriores, experimentou-se levar em conta todas as formações nos perfis das várias formas, e apenas a formação de topo.

Os critérios adoptados para cada uma das análises são apresentados de seguida, bem como os respectivos resultados.

a) Todas as formações são relevantes; formações distintas mas texturalmente semelhantes são distinguidas

Esta é a classificação com menor nível de generalização, incluindo 12 contextos litológicos e já apresentada na Tabela 97. Os perfis litológicos são apresentados novamente na Tabela 103. Destes, três estão associados a apenas uma forma (E1, E5, E7), invalidando a sua utilização na análise e justificando a sua exclusão.

Os resultados da análise discriminante são apresentados na Tabela 104 e na Figura 131. Tal como já realizado em III.4.3, e a fim de facilitar a interpretação dos resultados, construíram-se gráficos de dispersão relacionando a classe (i.e. o perfil) em que cada forma se insere e o seu *score* de acordo com a função discriminante (para as classificações discriminadas por uma função) ou os dois *scores* (para aquelas discriminadas por duas funções). Nestes casos, foram incluídos no gráfico os centróides de cada classe, ou seja, os pontos que resultam do cruzamento entre os *scores* médios por classe nas duas funções. No caso das variáveis discriminadas por uma só função, representaram-se os *scores* médios em associação às classes respectivas.

Tabela 103 - Os 9 perfis litológicos utilizados na análise discriminante. As sequências de formações são as mesmas definidas na Tabela 97, bem como os respectivos códigos. *Número* é o código numérico associado de forma a ser possível utilizar os perfis como *input* no SPSS 15.0. Os três perfis que caracterizam apenas uma forma não foram utilizados, sendo mostrados abaixo dos restantes em itálico.

Número	Código	Sequência de formações (desde o topo)	Formas
1	E2	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F02, F19, F20, F22
2	E3	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F11, F21
3	E4	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12, F13, F29
4	E6	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F18, F16
5	D1	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F04, F08, F09, F10, F14, F15, F17, F28
6	D2	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F05, F07
7	D3	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F24, F27
8	D4	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F23, F25
9	D5	Material avermelhado relativamente argiloso	F26, F03
-----	<i>E1</i>	<i>Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados</i>	<i>F30</i>
-----	<i>E5</i>	<i>Arenitos amarelados</i>	<i>F01</i>
-----	<i>E7</i>	<i>Arenitos esbranquiçados cimentados, com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados grosseiros, com cascalho</i>	<i>F06</i>

Tabela 104 - Resultados da análise discriminante usando 9 perfis litológicos. *n* - número de unidades de análise; *MB* - *p-value* obtido com um teste M de Box à homogeneidade das matrizes de variância-covariância entre os diferentes grupos; % *variância explicada* - percentagem da variância explicada pela função em termos das diferenças entre grupos. *Sig* - grau de significação associado a cada função obtida.

<i>n</i>	<i>MB</i>	Funções	% variância explicada	Variáveis (coeficientes)	<i>Sig</i>	% Classificação correcta
27	0,205	1	100	CP2 (1,455)	0,002	29,6

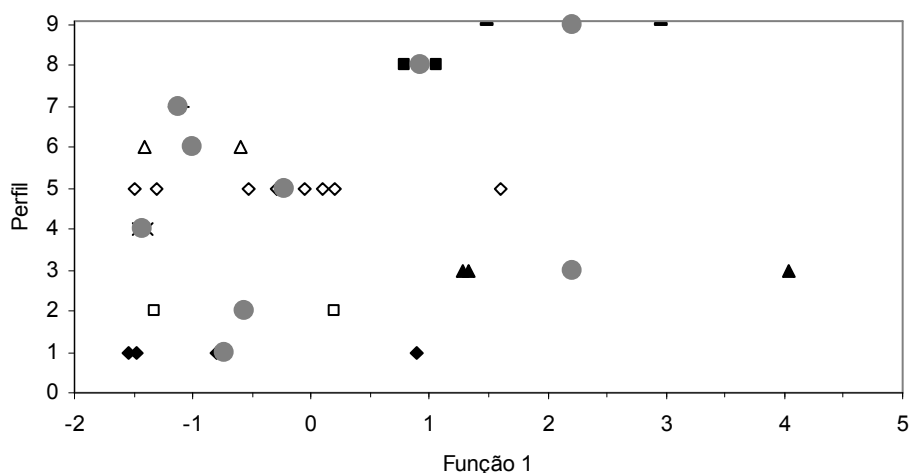


Figura 131 - Scores da função discriminante (*Função 1*) usando nove perfis litológicos (*Perfil*; 1-9). Círculos a cinzento representam os *scores* médios por classe.

A Tabela 104 mostra que foi possível obter apenas uma função discriminante, sendo esta considerada altamente significativa (de acordo com o *p-value* de 0,002) e incluindo apenas a CP 2 como variável independente. O resultado do teste M de Box permitiu validar o pressuposto de homogeneidade das matrizes de variância/covariância de cada grupo.

A função permitiu classificar correctamente apenas 29,6% das 27 formas abrangidas pela análise. Apesar de estes resultados serem muito pouco satisfatórios, a Figura 131 mostra que os *scores* da função discriminante permitem estabelecer um contraste claro entre dois grandes grupos.

Os perfis 3 e 9 estão associados aos valores mais elevados. Consistem ambos integralmente em materiais silto-argilosos (Figuras 128 (e) e 129 (e)), associando claramente a estas litologias a tendência para uma morfologia marcada por cabeceiras e perfis transversais mais suaves, entalhes menos profundos e cabeceiras menos declivosas (i.e. valores mais elevados na CP 2; o significado das várias Componentes Principais foi já apresentado na Tabela 87). O

oposto ocorre com os restantes perfis, associados a materiais mais grosseiros. O perfil 8 (arenitos amarelados com intercalações cascalhentas e argilosas sobre materiais relativamente silto-argilosos) ocorre numa posição algo intermédia.

b) Todas as formações são relevantes; formações distintas mas texturalmente semelhantes são consideradas equivalentes

De acordo com a mudança no segundo critério face à análise anterior, foram agregados os perfis constituídos exclusivamente por formações relativamente argilosas. Os onze perfis resultantes da nova classificação (dos quais apenas oito foram utilizados) são mostrados na Tabela 105, e os resultados na Tabela 106 e na Figura 132.

Tabela 105 - Os oito perfis utilizados na análise, após a agregação dos dois caracterizados exclusivamente por materiais relativamente argilosos. Os perfis que caracterizam apenas uma forma não foram utilizados, e são mostrados abaixo dos restantes em itálico.

Número	Código	Sequência de formações (desde o topo)	Formas
1	E2	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F02, F19, F20, F22
2	E3	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F11, F21
3	E4	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12, F13, F29
	D5	Material avermelhado relativamente argiloso	F26, F03
4	E6	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F18, F16
5	D1	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F04, F08, F09, F10, F14, F15, F17, F28
6	D2	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F05, F07
7	D3	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F24, F27
8	D4	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F23, F25
-----	<i>E1</i>	<i>Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados</i>	<i>F30</i>
-----	<i>E5</i>	<i>Arenitos amarelados</i>	<i>F01</i>
-----	<i>E7</i>	<i>Arenitos esbranquiçados cimentados, com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados grosseiros, com cascalho</i>	<i>F06</i>

Tabela 106 - Resultados da análise discriminante usando os oito perfis. *n* - número de elementos; *MB* - *p-value* obtido com um teste M de Box à igualdade das matrizes de variância-covariância entre os diferentes grupos; % *variância explicada* - percentagem da variância explicada pela função em termos das diferenças entre grupos. *Sig* - grau de significação associado à função obtida.

<i>n</i>	<i>MB</i>	Funções	% variância explicada	Variáveis (coeficientes)	<i>Sig</i>	% Classificação correcta
27	0,162	1	100	CP2 (1,495)	0,001	44,4

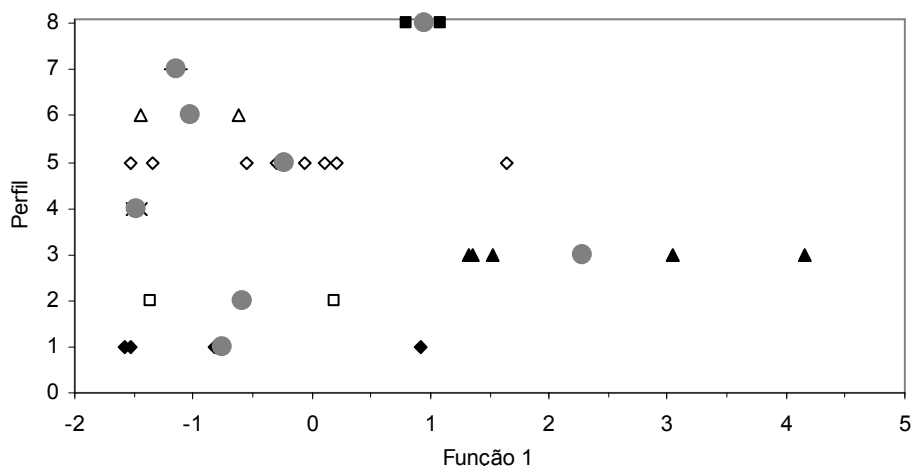


Figura 132 - Scores da função discriminante (*Função 1*) usando oito perfis litológicos (*Perfil*; 1-8). Círculos a cinzento representam os *scores* médios por classe.

A função gerada é significativa, tendo a agregação das duas classes conduzido a uma capacidade discriminante superior. Foi possível classificar correctamente 44,4% das 27 formas utilizadas. O contraste já observado entre as formas associadas a materiais silto-argilosos (perfil 3) e as restantes tornou-se mais evidente, conforme mostra a Figura 132.

c) Só as formações de topo são relevantes; formações distintas mas texturalmente semelhantes são distinguidas

A classificação em oito perfis resultante da aplicação dos dois critérios acima é mostrada na Tabela 107. Os resultados da análise (corrida apenas com seis perfis) são apresentados na tabela 108. Foi possível classificar correctamente 39,3% das formas usando a função discriminante baseada na CP2. A Figura 133 mostra o contraste já descrito entre os perfis constituídos exclusivamente por formações silto-argilosas (perfis 3 e 6) e os restantes.

Tabela 107 - Os seis perfis utilizados na análise, diferenciados levando em conta apenas a formação de topo, e sem associar formações distintas mas texturalmente semelhantes. Os perfis que caracterizam apenas uma forma não foram utilizados, sendo mostrados abaixo dos restantes em itálico.

Número	Código	Sequência de formações (desde o topo)	Formas
1	E1	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F30
	E2	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F02, F19, F20, F22
2	E3	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F11, F21
	E6	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F18, F16
3	E4	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12, F13, F29
4	D1	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F04, F08, F09, F10, F14, F15, F17, F28
	D4	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F23, F25
5	D2	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F05, F07
	D3	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F24, F27
6	D5	Material avermelhado relativamente argiloso	F26, F03
-----	E5	<i>Arenitos amarelados</i>	<i>F01</i>
-----	E7	<i>Arenitos esbranquiçados cimentados, com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados grosseiros, com cascalho</i>	<i>F06</i>

Tabela 108 - Resultados da análise discriminante. *n* - número de elementos; *MB* - *p-value* obtido com um teste M de Box à igualdade das matrizes de variância-covariância entre os diferentes grupos; % *variância explicada* - percentagem da variância explicada pela função em termos das diferenças entre grupos. *Sig* - grau de significação associado a cada função obtida.

n	M-box	Funções	% variância explicada	Variáveis (coeficientes)	Sig	% Classificação correcta
28	0,464	1	100	CP2 (1,459)	0,000	39,3

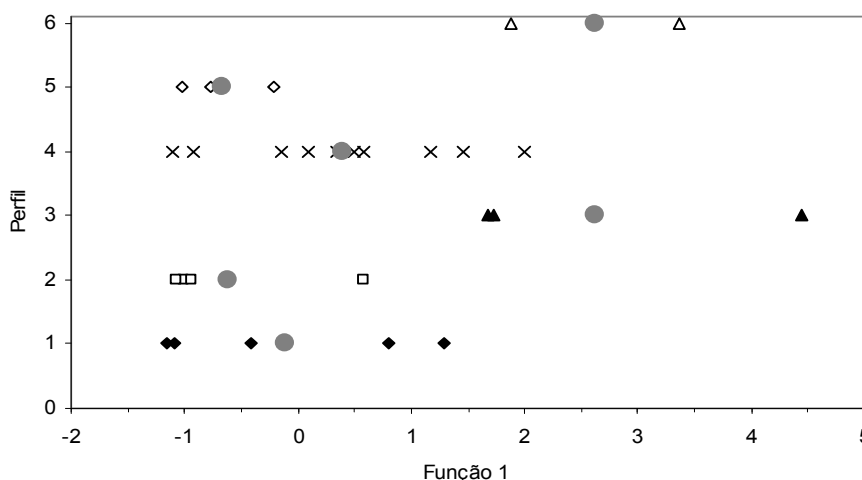


Figura 133 - Scores da função discriminante (*Função 1*) usando os seis perfis litológicos (*Perfil*; 1-6). Círculos a cinzento representam os *scores* médios por classe.

d) Só as formações de topo são relevantes; formações distintas mas texturalmente semelhantes são consideradas equivalentes

A classificação dos perfis utilizada é mostrada na Tabela 109, tendo resultado em seis perfis distintos. Os resultados da análise (usando cinco perfis) são apresentados na Tabela 110 e, graficamente, na Figura 134.

Importa aqui fazer referência ao único perfil representado apenas por uma forma (E7, com a forma F06). Inicialmente, experimentou-se associar este perfil àqueles agregados sob os números 2 e 4. Embora os arenitos com intercalações conglomeráticas em E7 se encontrem relativamente cimentados, são texturalmente mais semelhantes a estes dois grupos do que aos restantes. Porém, em ambos os casos a classificação final produziu resultados inferiores àqueles obtidos excluindo completamente da análise este perfil (em ambos os casos, foram correctamente classificados 36,7% dos casos).

Tabela 109 - Os cinco perfis litológicos utilizados na análise, diferenciados levando em conta apenas a formação de topo, e agregando formações distintas mas texturalmente semelhantes. O único perfil que caracteriza apenas uma forma não foi utilizado, sendo mostrado abaixo dos restantes em *itálico*.

Número	Código	Sequência de formações (desde o topo)	Formas
1	E1	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F30
	E2	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F02, F19, F20, F22
2	E3	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F11, F21
	E6	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F18, F16
3	E4	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12, F13, F29
	D5	Material avermelhado relativamente argiloso	F26, F03
4	E5	Arenitos amarelados	F01
	D2	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F05, F07
	D3	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F24, F27
5	D1	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F04, F08, F09, F10, F14, F15, F17, F28
	D4	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F23, F25
-----	<i>E7</i>	<i>Arenitos esbranquiçados cimentados, com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados grosseiros, com cascalho</i>	<i>F06</i>

Tabela 111 - Os quatro perfis utilizados na análise, diferenciados levando em conta todas as formações nos perfis das formas, e agregando formações semelhantes em termos da sua componente textural predominante (silto-argilosa, arenitos ou conglomerados).

Número	Código	Sequência de formações (desde o topo)	Formas
1	E1	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F30
	E2	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F02, F19, F20, F22
2	E3	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F11, F21
	E5	Arenitos amarelados	F01
	E6	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F18, F16
	E7	Arenitos esbranquiçados cimentados, com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados grosseiros, com cascalho	F06
	D1	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F04, F08, F09, F10, F14, F15, F17, F28
	D2	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F05, F07
3	D3	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F24, F27
	D4	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material avermelhado relativamente argiloso	F23, F25
4	D5	Material avermelhado relativamente argiloso	F26, F03
	E4	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12, F13, F29

Tabela 112 - Resultados da análise discriminante usando os quatro perfis. *n* - número de elementos; *MB* - *p-value* obtido com um teste M de Box à igualdade das matrizes de variância-covariância entre os diferentes grupos; *% variância explicada* - percentagem da variância explicada pela função em termos das diferenças entre grupos. *Sig* - grau de significação associado a cada função obtida. O valor associado à função 1 refere-se às três funções extraídas, com o valor associado à função 2 referindo-se às funções 2 e 3, e o valor da função 3 descrevendo apenas a significação desta.

<i>n</i>	<i>MB</i>	Funções	% variância explicada	Variáveis (coeficientes)	<i>Sig</i>	% Classificação correcta
30	0,737	1	90,8	CP2 (1,316); CP4 (0,790); CP6 (0,778)	0,000	70,0
		2	8,2	CP2 (-0,396); CP4 (0,913); CP6 (-0,257)	0,222	
		3	1,0	CP2 (-0,488); CP4 (0,016); CP6 (0,807)	0,415	

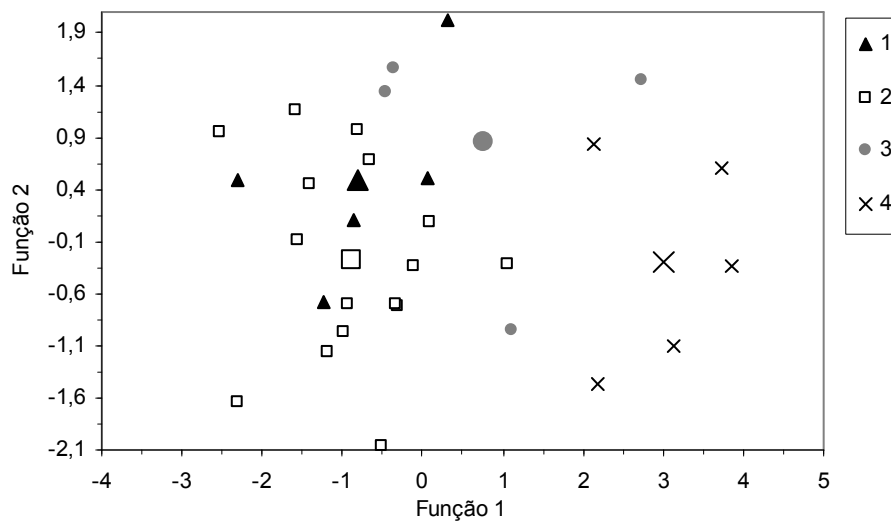


Figura 135 - *Scores* das duas primeiras funções discriminantes extraídas por perfil litológico (1-4). Símbolos de dimensões maiores representam os valores médios por perfil.

A análise permitiu extrair três funções discriminantes, permitindo classificar correctamente 70% dos sistemas de ravinhas. A Tabela 112 mostra, porém, que apenas a primeira destas funções se revelou estatisticamente significativa, explicando por si cerca de 91% da variância relativa às diferenças entre grupos. Esta função foi usada juntamente com a segunda para criar o gráfico de dispersão na Figura 135 em ordem a facilitar a interpretação dos resultados. A figura mostra que, à imagem do que foi possível observar nos resultados das análises anteriores, a análise discriminante permite estabelecer uma diferença clara entre os perfis dominados por materiais silto-argilosos (perfil 4) e os restantes. Levando em conta as componentes principais consideradas significativas e respectivos coeficientes (Tabela 112), é possível constatar que as formas dominadas por materiais silto-argilosos tendem a possuir perfis transversais mais suaves, cabeceiras menos declivosas e profundidades menores (CP2 mais elevada), a serem mais alargadas no sector montante face ao sector jusante, bem como mais alongadas (CP4 mais elevada), e a possuírem perfis longitudinais mais côncavos (CP6 mais elevada).

É também de referir que as formas com perfis em que arenitos se sobrepõem a materiais silto-argilosos (associadas ao nº 3) se situam numa posição algo intermédia em termos dos *scores* da função 1 entre o perfil 4 e os restantes, o que parece confirmar o papel exercido pelos materiais mais finos, completamente inexistentes nos perfis 1 e 2, sobre a morfologia dos sistemas de ravinhas.

f) Só as formações de topo são relevantes; formas são associadas em função da classe granulométrica dominante (silto-argilosa, arenitos, conglomerados)

Todas as 30 formas foram agregadas em três perfis-tipo, delimitados no topo por conglomerados, arenitos (com ou sem intercalações) ou materiais silto-argilosos (Tabela 113). Os resultados da análise são apresentados na Tabela 114 e na Figura 136.

Tabela 113 - Os três perfis utilizados na análise, diferenciados levando em conta apenas as formações no topo dos perfis das formas, e agregando formações semelhantes em termos da sua componente textural predominante (silto-argilosa, arenitos, ou conglomerados).

Número	Código	Sequência de formações (desde o topo)	Formas
1	E1	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F30
	E2	Conglomerados compactos - arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F02, F19, F20, F22
2	E3	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas	F11, F21
	E5	Arenitos amarelados	F01
	E6	Arenitos alaranjados com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados	F18, F16
	E7	Arenitos esbranquiçados cimentados, com intercalações conglomeráticas - arenitos amarelados grosseiros, com cascalho	F06
	D1	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F04, F08, F09, F10, F14, F15, F17, F28
	D2	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas	F05, F07
	D3	Arenitos alaranjados a avermelhados com cascalho - Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material vermelho relativamente argiloso	F24, F27
	D4	Arenitos amarelados com intercalações relativamente argilosas e cascalhentas - material vermelho relativamente argiloso	F23, F25
3	D5	Material avermelhado relativamente argiloso	F26, F03
	E4	Material relativamente argiloso de cor alaranjada a avermelhada	F12, F13, F29

Tabela 114 - Resultados da análise discriminante usando os três perfis. *n* - número de elementos; *MB* - *p-value* obtido com um teste M de Box à igualdade das matrizes de variância-covariância entre os diferentes grupos; *% variância explicada* - percentagem da variância explicada pela função em termos das diferenças entre grupos. *Sig* - grau de significação associado a cada função obtida. O valor associado à função 1 refere-se às duas funções extraídas, com o valor associado à função 2 referindo-se apenas a esta.

n	MB	Funções	% variância explicada	Variáveis (coeficientes)	Sig	% Classificação correcta
30	0,945	1	98,4	CP2 (1,272); CP6 (0,737)	0,000	80,0
		2	1,6	CP2 (-0,481); CP6 (0,830)	0,438	

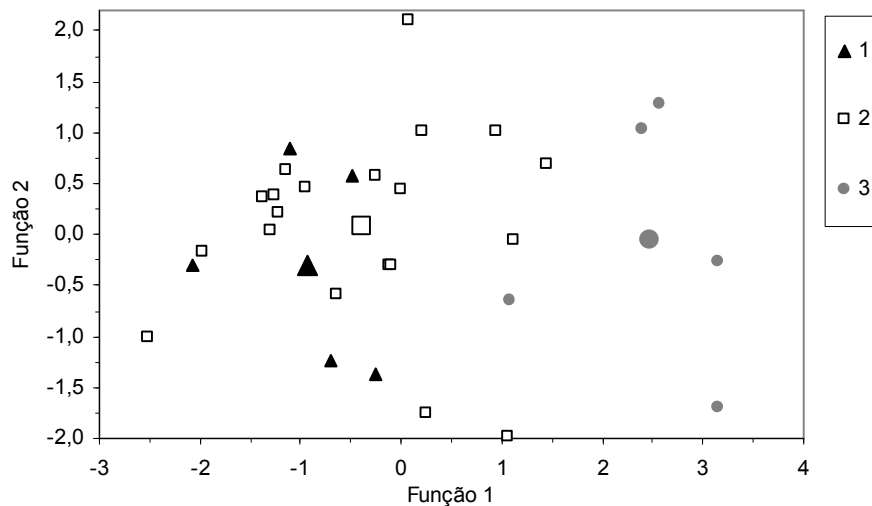


Figura 136 - *Scores* das duas funções discriminantes extraídas por perfil litológico (1-3). Os símbolos de dimensões maiores representam os valores médios por perfil.

Foi possível extrair duas funções discriminantes das quais, tal como na análise anterior, apenas a primeira se revelou estatisticamente significativa (Tabela 114), explicando 98,4% da variância relativa às diferenças entre grupos. Conjuntamente, as funções permitiram classificar correctamente 80% dos sistemas de ravinhas, o melhor resultado de todas as classificações já testadas.

A análise da Figura 136 mostra que, tal como nas análises anteriores, o grande contraste se verifica entre o perfil dominado por materiais silto-argilosos (perfil 3) e os restantes, definindo-se com base nos valores da função 1. Neste caso, porém, apenas as componentes principais 2 e 6 foram consideradas significativas, indicando que as formas com perfis dominados no topo por materiais silto-argilosos tendem a possuir perfis transversais mais suaves, menores profundidades, cabeceiras menos declivosas e perfis longitudinais mais côncavos.

Em suma, e considerando os resultados das várias funções discriminantes obtidas, fica clara a existência de uma relação significativa entre a morfologia dos sistemas de ravinhas e o contexto litológico em que evoluíram. Os resultados, porém, permitiram apenas definir que as formas evoluídas sobre materiais silto-argilosos tendem a apresentar perfis transversais mais suaves, profundidades menores, cabeceiras menos declivosas e perfis longitudinais mais côncavos do que as restantes. Em contraste, não foi possível diferenciar entre si formas cujos perfis são constituídos por outras formações. Não foi assim possível diferenciar, com base na morfologia, conglomerados de arenitos, ou arenitos de arenitos com intercalações.

As análises também mostraram que a influência da litologia é sobretudo exercida pela formação no topo do perfil, ou seja, aquela onde os sistemas de ravinas se originaram, e que terá exercido um controlo maior ao longo do seu desenvolvimento. Tal é indicado pelo facto de terem sido quase sempre obtidas melhores capacidades discriminantes usando perfis individualizados com base na formação de topo, por oposição a todas as formações observadas nas paredes e cabeceiras das formas (39,3%, 41,4% e 80% de classificações correctas, por oposição a 29,6%, 44,4% e 70%).

Do ponto de vista dos processos geomorfológicos, os resultados sugerem uma associação entre materiais silto-argilosos e uma dinâmica evolutiva marcada por movimentos de massa nas paredes e nos sectores de cabeceira. Estes levarão a uma expansão mais dinâmica das formas, à manutenção de ângulos menores nas paredes e cabeceiras (em função da menor resistência tangencial dos materiais em contextos de elevados teores em humidade) e, ao mesmo tempo, à deposição de material nos fundos, por sua vez reduzindo o declive e a profundidade e originando os perfis transversais relativamente suaves descritos por valores relativamente elevados da CP 2. A natureza fortemente dispersiva das duas formações silto-argilosas encontradas (MDREG3 e MEREG4; vd. Figura 126) e a já descrita observação frequente de fracturas de dessecação no terreno (III.4.4.1.1), sinalizando a presença de argilas expansivas, reforçam esta interpretação ao promoverem a formação e o alargamento de descontinuidades no material e o colapso de fragmentos de diferentes dimensões. A formação e evolução de uma rede de descontinuidades constitui adicionalmente um factor de humedecimento, sujeitando uma maior superfície ao contacto directo com a precipitação e o escoamento, promovendo a perda de coesão e a diminuição da resistência tangencial, e contribuindo finalmente para a ocorrência de colapsos.

4.6. Relações Factores de controlo - Processos

Após dar atenção às relações entre diferentes propriedades morfológicas (III.4.1.8), entre a morfologia e os processos evolutivos observados no terreno (III.4.3), e entre a morfologia e um conjunto de factores que potencialmente controlam diferentes processos (III.4.5), restam considerar as relações entre os processos observados e o conjunto de potenciais factores de controlo. De acordo com o enquadramento conceptual proposto (vd. I.6), expresso gráficamente na Figura 86, o conjunto destas análises possibilitará a perspectiva integral pretendida sobre os complexos de ravinas em estudo, assente na articulação das diferentes dimensões que constituem o fenómeno do ravinamento (morfologia, processos, factores).

Dada a existência de dados quantitativos e qualitativos (à semelhança do que já ocorreu em III.4.3 e III.4.5.2) tornou-se necessário conjugar diferentes técnicas de análise.

Começou-se por relacionar os dados quantitativos referentes a 13 dos 14 factores de controlo considerados¹¹⁷ com os dados qualitativos referentes aos processos¹¹⁸, averiguando através de análise discriminante a capacidade dos primeiros para discriminar os segundos.

De seguida, foram consideradas as relações entre o último factor de controlo potencial, a litologia, e os processos. Dado que todas as variáveis nesta última análise foram de natureza qualitativa, recorreu-se ao teste do Qui-quadrado para procurar relações significativas.

4.6.1. Factores quantitativos e processos: análise discriminante

Pretendeu-se avaliar a capacidade dos treze potenciais factores de controlo de natureza quantitativa para discriminar entre as classes dos sete processos evolutivos caracterizados no campo¹¹⁹, assumindo-se as relações estatisticamente significativas como indicando um possível controlo. Tal como anteriormente, a análise discriminante (AD) foi aplicada usando o SPSS 15.0 e o mesmo conjunto de parâmetros de entrada já descrito (cf. III.4.3). Começou-se por verificar os pressupostos desta técnica, tendo sido realizados testes de Kolmogorov-Smirnov em ordem a determinar a normalidade das 13 variáveis independentes (Tabela 115). Foi também construída uma matriz de correlação a fim de verificar até que ponto existem correlações significativas entre pares de variáveis (Tabela 116).

Os resultados mostram que nenhum dos pressupostos se mantém para a totalidade das variáveis. Foi possível rejeitar significativamente a hipótese de normalidade para 6 dos 13 factores, enquanto a Tabela 116 mostra numerosas correlações significativas e muito significativas entre pares de factores. Este último resultado é expectável, dado que algumas variáveis são parte integrante de outras (*Declive e Área de drenagem* integram os dois índices topográficos adoptados), e outras constituem valores médios e extremos de uma mesma distribuição (como ocorre com o declive, as curvaturas e os dois índices topográficos).

¹¹⁷ Estes factores foram já descritos em III.4.4.

¹¹⁸ Já descritos em III.4.2.

¹¹⁹ Notar que, das nove variáveis processuais descritas em III.4.2 e na Tabela 89, duas apresentaram apenas uma das 30 formas não inserida na mesma classe. Essas duas variáveis não foram incluídas nesta análise (vegetação no fundo no corpo das formas e vegetação no fundo no sector de desembocadura), tal como na análise prévia das relações entre processos e morfologia (III.4.3).

Tabela 115 - Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov realizados a fim de aferir a normalidade dos 13 factores de controlo potenciais de natureza quantitativa. *K-S*: *p-value* obtido. Valores considerados significativos ($K-S \leq 0,05$) foram acentuados a negrito.

Factor	K-S
A_dren	0,011
CPL_min	0,003
CPL_med	0,800
CPL_max	0,001
CPER_min	0,003
CPER_med	0,639
CPER_max	0,008
Dec_max	0,341
Dec_med	0,834
IPE_med	0,834
IPE_max	0,002
ITE_med	0,912
ITE_max	0,151

Tabela 116 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre pares de factores. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$. A tabela foi dividida em duas partes sobrepostas.

	Dec_max	Dec_med	IPE_med	IPE_max	ITE_med	ITE_max
Dec_max	1	0,441*	0,226	0,234	-0,404*	0,266
Dec_med	0,441*	1	0,001	-0,340	-0,742**	-0,391*
IPE_med	0,226	0,001	1	0,689**	0,457*	0,753**
IPE_max	0,234	-0,340	0,689**	1	0,383*	0,814**
ITE_med	-0,404*	-0,742**	0,457*	0,383*	1	0,544**
ITE_max	0,266	-0,391*	0,753**	0,814**	0,544**	1
CPL_min	-0,732**	0,060	-0,196	-0,432*	0,003	-0,482**
CPL_med	-0,240	-0,288	-0,605**	-0,130	-0,083	-0,358
CPL_max	0,782**	-0,026	0,023	0,300	-0,137	0,307
CPER_min	-0,798**	-0,095	-0,115	-0,319	0,243	-0,340
CPER_med	-0,040	0,121	0,135	0,008	0,158	0,131
CPER_max	0,643**	-0,052	0,287	0,493**	0,082	0,521**
A_dren	0,390*	-0,299	0,400*	0,815**	0,219	0,705**

	CPL_min	CPL_med	CPL_max	CPER_min	CPER_med	CPER_max	A_dren
Dec_max	-0,732**	-0,240	0,782**	-0,798**	-0,040	0,643**	0,390*
Dec_med	0,060	-0,288	-0,026	-0,095	0,121	-0,052	-0,299
IPE_med	-0,196	-0,605**	0,023	-0,115	0,135	0,287	0,400*
IPE_max	-0,432*	-0,130	0,300	-0,319	0,008	0,493**	0,815**
ITE_med	0,003	-0,083	-0,137	0,243	0,158	0,082	0,219
ITE_max	-0,482**	-0,358	0,307	-0,340	0,131	0,521*	0,705**
CPL_min	1	0,103	-0,897**	0,834**	0,085	-0,947**	0,681**
CPL_med	0,103	1	0,118	0,072	-0,031	-0,119	-0,026
CPL_max	-0,897**	0,118	1	-0,806**	-0,129	0,782**	0,511
CPER_min	0,834**	0,072	-0,806**	1	0,264	-0,732**	0,530**
CPER_med	0,085	-0,031	-0,129	0,264	1	0,028	-0,104
CPER_max	-0,947**	-0,119	0,782**	-0,732**	0,028	1	0,74677
A_dren	-0,681**	-0,026	0,511**	-0,530**	-0,104	0,747**	1

Com o fim de evitar a colinearidade, optou-se por simplificar as 13 variáveis extraíndo componentes principais (CP). O procedimento utilizado foi idêntico ao já descrito para as variáveis morfológicas em III.4.1.8.2, começando-se por extrair tentativamente um número relativamente elevado de componentes (Tabela 117). De forma complementar, analisou-se graficamente a variação dos valores próprios (*eigenvalues*) ao longo das várias componentes obtidas, a fim de determinar quebras na sucessão dos valores (Figura 137).

Conforme a Tabela 117 mostra, as primeiras quatro CP explicam conjuntamente 84,25% da variância total, sendo que cada uma das restantes tem um poder explicativo inferior a uma das variáveis originais (valor próprio < 1). A Figura 137 mostra, adicionalmente, uma inflexão na linha de tendência centrada na CP4¹²⁰. Face a estes resultados, retiveram-se as primeiras quatro componentes, sendo os seus coeficientes de correlação face às 13 variáveis originais (*loadings*) apresentados na Tabela 118 de forma a possibilitar a interpretação. Os *scores* de cada uma das 30 formas em cada uma das quatro CP são apresentados na Tabela 119.

A **componente 1** correlaciona-se positivamente com a área de drenagem (*A_dren*), os valores máximos dos dois índices topográficos (*IPE_max* e *ITE_max*) e o declive máximo (*Dec_max*). Apresenta também um valor de correlação um pouco menor com o índice de potência do escoamento médio (*IPE_med*). No que diz respeito às curvaturas, correlaciona-se positivamente com os valores máximos das curvaturas planar e de perfil (*CPL_max* e *CPER_max*), e negativamente com os valores mínimos (*CPL_min* e *CPER_min*), não se verificando correlação face aos valores médios.

Enquanto factor de ravinamento, esta CP parece descrever uma alimentação abundante em escoamento nos sectores de iniciação das formas (desembocaduras)¹²¹. Também exprime a ocorrência de contrastes elevados na forma topográfica, indicados pela associação simultânea a valores elevados das curvaturas máximas e a valores reduzidos das curvaturas mínimas, bem como valores elevados de declive máximo (o declive mínimo não foi alvo de consideração). Porém, (e tal como observado em 4.5.1 no contexto das relações entre morfologia dos complexos de ravinas e possíveis factores) estas relações não parecem traduzir uma relação de causa e efeito face ao ravinamento, mas apenas o facto de que as áreas de drenagem mais elevadas tendem a estar associadas a complexos de ravinas de grandes dimensões, abrangendo portanto áreas mais extensas onde a probabilidade de ocorrência de maior variação na forma topográfica é mais elevada.

¹²⁰ Também são visíveis inflexões na CP2 e na CP6. No entanto, a CP4 adquire maior relevância enquanto ponto de transição entre componentes com valores próprios superiores e inferiores a 1.

¹²¹ Os valores de área de drenagem correspondem às desembocaduras, bem como os valores máximos dos dois índices topográficos (em que a área de drenagem é uma componente fundamental).

Tabela 117 - Variância explicada por cada uma das 10 componentes principais (CP) definidas numa análise preliminar, expressa em variáveis (*Valores próprios*), percentagem (%) e percentagem acumulada (% *acum*).

	Valores próprios (<i>eigenvalues</i>)	%	% acum
1	5,106	39,279	39,279
2	2,834	21,797	61,076
3	1,973	15,174	76,25
4	1,039	7,995	84,245
5	0,696	5,353	89,598
6	0,372	2,864	92,462
7	0,315	2,421	94,883
8	0,243	1,870	96,753
9	0,14	1,075	97,828
10	0,125	0,963	98,791

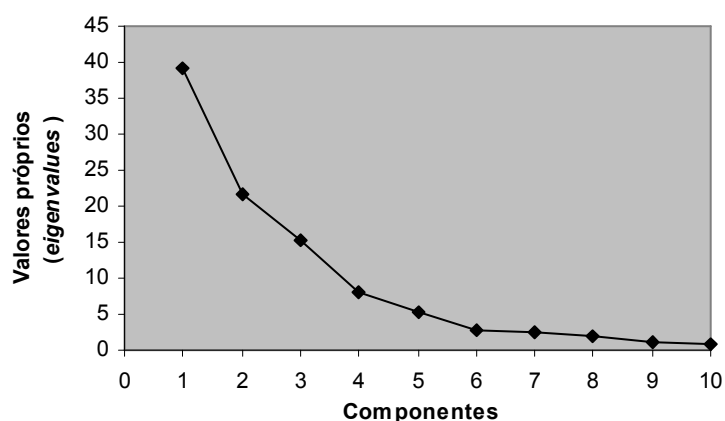


Figura 137 - Distribuição dos valores próprios por componente principal, para um conjunto inicial de 10 componentes. Valores por ordem decrescente.

Tabela 118 - Coeficientes de correlação linear (*loadings*) entre as 13 variáveis originais e as quatro CP definidas. Valores acima de 0,500 foram evidenciados de forma a facilitar a interpretação.

Variáveis	Componentes principais			
	1	2	3	4
A_dren	0,770	0,251	0,275	-0,078
CPL_min	-0,797	0,179	-0,103	-0,116
CPL_med	-0,261	-0,060	0,808	0,360
CPL_max	0,770	-0,423	0,268	0,135
CPER_min	-0,732	0,505	-0,179	0,056
CPER_med	-0,017	0,261	-0,299	0,899
CPER_max	0,887	-0,092	-0,033	0,145
Dec_max	0,762	-0,520	-0,246	0,060
Dec_med	-0,011	-0,607	-0,709	0,070
IPE_med	0,496	0,483	-0,642	-0,089
IPE_max	0,764	0,434	0,229	-0,130
ITE_med	0,135	0,892	-0,008	0,074
ITE_max	0,682	0,606	-0,105	-0,038

Tabela 119 - *Scores* dos 30 sistemas de ravinas em estudo face a cada uma das quatro CP selecionadas.

Formas	Componentes Principais			
	1	2	3	4
1	-0,082	-0,665	-2,010	1,863
2	-0,469	-0,217	0,018	-0,583
3	-1,082	-0,279	1,524	-0,257
4	-0,287	-1,993	-0,340	1,304
5	-0,630	-0,747	1,141	-0,372
6	-1,018	0,754	0,773	0,517
7	-0,512	-0,330	1,056	-0,179
8	0,285	0,747	1,524	-0,741
9	-0,126	0,728	-0,486	-1,080
10	-0,912	-0,355	0,700	-0,315
11	-0,592	-0,256	-1,283	-1,155
12	-0,773	0,182	1,285	0,535
13	-1,106	0,552	0,867	0,761
14	1,197	-1,331	0,002	-2,041
15	1,842	-2,111	1,121	0,704
16	0,006	-1,075	-0,001	-1,404
17	-0,286	-0,032	-1,092	-0,979
18	0,159	1,347	-0,943	0,338
19	0,159	-0,792	-0,425	1,028
20	0,930	1,534	-0,888	-1,302
21	-1,138	0,513	0,789	0,394
22	-0,093	-0,289	-1,743	-0,796
23	0,508	0,291	-1,605	0,735
24	0,112	-0,932	-0,868	1,595
25	-0,465	0,119	-0,391	0,614
26	0,420	1,593	-0,142	0,642
27	1,565	2,235	0,238	0,197
28	-0,547	-0,421	-0,398	-1,748
29	-0,640	1,186	0,298	1,230
30	3,575	0,041	1,278	0,493

A **componente 2** correlaciona-se positivamente com a curvatura de perfil mínima (*C_{PER_min}*), e os valores médios e máximos de Índice Topográfico de Encharcamento (*ITE_med* e *ITE_max*, com *ITE_med* a mostrar o coeficiente de correlação mais elevado). Por oposição, correlaciona-se negativamente com os declives máximo e médio (*Dec_max* e *Dec_med*). Pode ser interpretada como descrevendo um contexto topográfico relativamente suave e marcadamente côncavo em termos longitudinais (devido aos valores elevados de *C_{PER_min}*), promovendo a concentração do escoamento mas não a sua evacuação, e portanto a ocorrência de elevados teores de água no rególito. As correlações verificadas face aos valores médios de declive e ITE indicam que o contexto topográfico expresso por esta CP não se restringe apenas aos sectores de iniciação das formas, mas sim à generalidade da topografia que vieram a ocupar.

A **componente 3** correlaciona-se positivamente com a curvatura planar média (*C_{PL_med}*), e negativamente com o declive e o Índice de Potência do Escoamento médios (*Dec_med* e *IPE_med*). Pode ser interpretada como descrevendo contextos topográficos em que o fraco declive e um perfil transversal de reduzida concavidade (ou mesmo plano ou convexo)

promovem a dispersão e a infiltração do escoamento, por oposição à sua concentração e ocorrência à superfície.

Finalmente, a **componente 4** está fortemente associada à curvatura de perfil média (*CPER_med*), sendo essa a única correlação observada. Pode ser interpretada simplesmente como descrevendo topografias tendencialmente côncavas em termos longitudinais, e portanto promotoras da desaceleração do escoamento.

Dado que as componentes extraídas são, por definição, ortogonais, considerou-se desnecessário validar o pressuposto da não-colinearidade entre as variáveis independentes em ordem a utilizá-las na análise discriminante. O pressuposto de normalidade foi validado realizando uma vez mais testes de Kolmogorov-Smirnov. Os resultados não permitiram rejeitar a hipótese de normalidade com uma margem de erro inferior a 5%, tendo sido obtidos *p-values* de 0,307 (CP1); 0,971 (CP2); 0,727 (CP3) e 0,642 (CP4).

Finalmente, foi corrida a análise discriminante usando as quatro CP para cada um dos sete processos. Os resultados mostraram que apenas foi possível discriminar significativamente a ocorrência de fragmentação por dessecação nas paredes e cabeceiras (*Frg_dess*), com base na CP3. Nenhum dos restantes processos apresentou qualquer relação com as componentes principais.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 120 e, graficamente, na Figura 138.

Tabela 120 - Resultados da análise discriminante obtidos em relação à ocorrência de fragmentação por dessecação (*Frg_dess*) nas paredes e cabeceiras das formas. *n* - número de elementos; *MB* - *p-value* obtido com um teste M de Box à igualdade das matrizes de variância-covariância entre os diferentes grupos; *% variância explicada* - percentagem da variância explicada pela função em termos das diferenças entre grupos. *Sig* - grau de significância associado à função obtida.

n	MB	Funções	% variância explicada	Variáveis (coeficientes)	Sig	% Classificação correcta
30	0,320	1	100	CP3 (1,120)	0,004	70,0

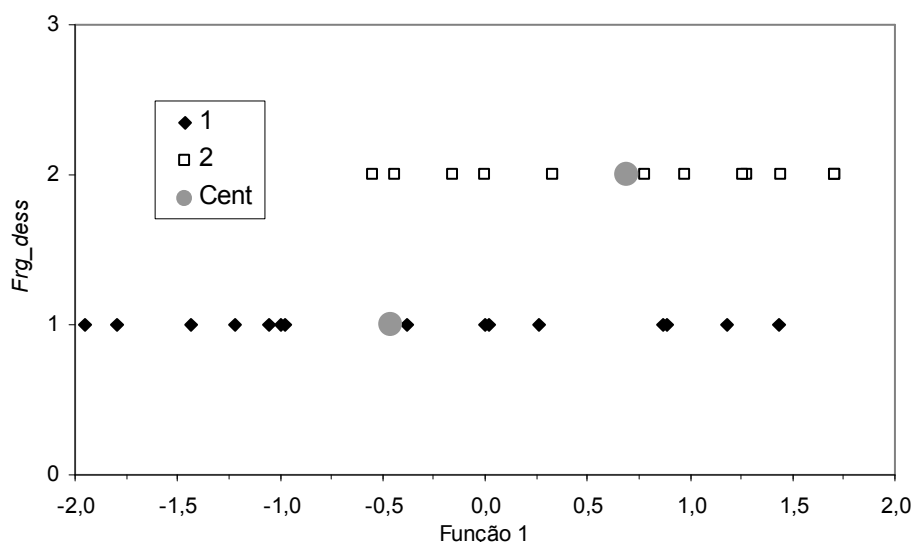


Figura 138 - Scores da função discriminante (*Função 1*) por classe de fracturação por dessecação (*Frg_dess*; 1 - *Inexistente ou Pontual*; 2 - *Sistemática*). *Cent* - scores médios por grupo (i.e. classe de *Frg_dess*).

A análise da figura mostra que, no que concerne aos valores da função discriminante, existe uma importante sobreposição entre as formas com fracturação por dessecação inexistente ou pontual (1), e as que apresentam o processo de modo sistemático (2). No entanto, é também claro que todas as formas em que o processo ocorre de modo sistemático possuem valores relativamente elevados em comparação com as restantes. À luz do significado da CP3, este resultado mostra que as formas em que a fragmentação por dessecação não ocorre de forma sistemática evoluíram em topografia variável; aquelas em que o processo ocorre sistematicamente concentram-se em contextos topográficos promotores da dispersão e infiltração do escoamento. São expectáveis nestes contextos a ocorrência relativamente frequente de teores elevados de água no solo e a ocorrência igualmente frequente de dessecação após os eventos de alimentação em água¹²², produzindo os ciclos de humedecimento e dessecação conducentes à fragmentação do rególito. Por oposição, é de salientar o facto de a CP2 (descrevendo uma topografia promotora de encharcamento) não se ter mostrado capaz de discriminar entre as classes de ocorrência de fragmentação: ao promover a manutenção de elevados teores em humidade no rególito, este contexto não promove a sucessão frequente de humedecimento e dessecação necessária à ocorrência sistemática do processo.

¹²² A dessecação após os eventos de alimentação em água é promovida pela curvatura planar média elevada, levando à dispersão do escoamento por oposição à sua concentração.

Em suma, a análise das relações entre factores expressos quantitativamente e processos permitiu estabelecer uma associação clara entre forma topográfica e fragmentação por dessecação. Importa explicitar que este processo em particular não pode nunca ocorrer exclusivamente em função da topografia, requerendo a existência de argilas de natureza expansiva.

4.6.2. Litologia e processos

Recorreu-se ao teste do Qui-quadrado (X^2) em ordem a aferir até que ponto a ocorrência de diferentes classes das variáveis referentes aos processos é independente do contexto litológico das formas.

Estando os dados referentes a cada possível combinação litologia-processo organizados numa matriz de contingência com L linhas e C colunas e sendo O_{ij} cada um dos valores observados (linha i e coluna j), a estatística de teste é calculada como (Maroco, 2007: 104):

$$X^2 = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^C \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}$$

As frequências esperadas E_{ij} são dadas por:

$$E_{ij} = \frac{L_i \times C_j}{N}$$

sendo que:

$$L_i = \sum_{j=1}^C O_{ij} \quad \text{e} \quad C_j = \sum_{i=1}^L O_{ij}$$

A aplicação rigorosa deste teste pressupõe três condições: (1) O número de unidades de análise (N) é superior a 20; (2) todos os valores esperados (E_{ij}) são superiores a 1; e (3) pelo menos 80% dos E_{ij} são superiores a 5.

No que concerne à litologia, optou-se por utilizar a classificação mais generalizada, associando cada formação a uma de três classes consoante a componente textural mais importante, e levando em conta apenas a formação no topo do perfil. Esta foi a classificação que mostrou melhores resultados quando relacionada com a morfologia em III.4.5.2. Utilizou-se o SPSS 15.0, sendo os resultados relativos aos vários processos apresentados na Tabela 121. Tal como a leitura da tabela mostra, não foi possível satisfazer em nenhum dos casos as três condições inerentes à aplicação rigorosa do teste do Qui-Quadrado. De forma a lidar com estas situações, o SPSS 15.0 oferece uma alternativa ao método clássico baseada na simulação de Monte Carlo. De acordo com esta aproximação, e dado que não é possível assumir como

conhecida a distribuição da estatística de teste¹²³, é realizado um número elevado de simulações aleatórias a fim de definir qual a probabilidade de obter um χ^2 igual ou mais extremo do que aquele obtido pelo método clássico (Maroco, 2007: 108).

Em ordem a aplicar o método de Monte-Carlo, foram realizadas 10000 extracções aleatórias para cada um dos processos e foi definida como significativa uma margem de erro de 0,05. Os resultados são mostrados conjuntamente com os da aproximação tradicional na Tabela 121.

Tabela 121 - Resultados da aplicação do teste Qui-Quadrado à relação entre processos e contexto litológico, tanto na sua aproximação clássica como na aproximação baseada em simulação de Monte-Carlo (MC). χ^2 - Estatística de teste; α - Margem de erro associada à rejeição da H_0 (classe de processo é independente da litologia).

Processo	Método	χ^2	α	% valores <5
Fract	CL	4,038	0,133	Valores < 5 = 83,3%
	MC		0,234	
Frg_dess	CL	11,042	0,004	Valores < 5 = 66,7%
	MC		0,003	
Vg_P	CL	6,623	0,157	Valores < 5 = 77,8%
	MC		0,160	
Vg_C	CL	7,877	0,096	Valores < 5 = 77,8%
	MC		0,084	
Din_P	CL	6,050	0,195	Valores < 5 = 77,8%
	MC		0,192	
Din_C	CL	10,032	0,040	Valores < 5 = 66,7%
	MC		0,028	
Flt	CL	6,250	0,181	Valores < 5 = 88,9%
	MC		0,189	

A análise da tabela mostra que apenas a ocorrência de fragmentação por dessecação (*Frg_dess*) e a dinâmica na cabeceira (*Din_c*) puderam ser relacionadas de forma significativa com o contexto litológico. De forma a facilitar a interpretação destas relações, foram construídos gráficos articulando as classes das duas variáveis processuais com os diferentes contextos litológicos (Figuras 139 e 140).

No que concerne à fragmentação por dessecação, a figura mostra claramente que o processo ocorre de forma sistemática em todas as formas com o topo dos perfis dominado por material silto-argiloso, e é sempre inexistente ou pontual nas formas com perfis limitados no topo por material conglomerático. Nas formas com perfis limitados por arenitos, é na maioria das vezes (13 em 20) inexistente ou pontual. No todo, é clara a associação entre fragmentação por dessecação e material silto-argiloso, sinalizando a natureza expansiva dos minerais de argila.

¹²³ Cumprindo-se as três condições já referidas, pode-se assumir que χ^2 tem distribuição $\chi^2 (L-1)(C-1)$.

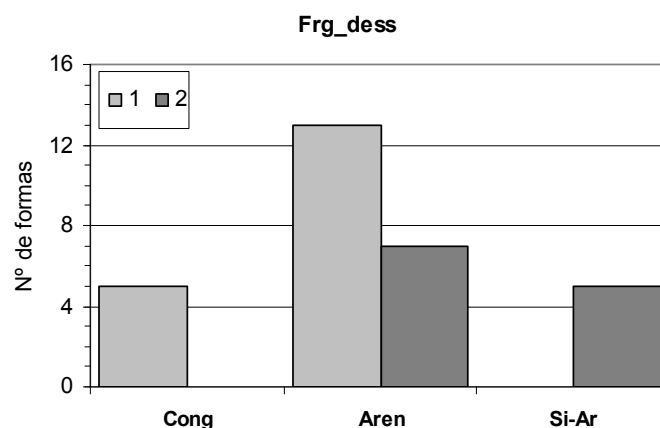


Figura 139 - Distribuição das formas por classe de ocorrência de fragmentação por dessecação e contexto litológico. Classes de processo: ocorrência inexistente ou pontual (1); ocorrência sistemática (2). Contextos litológicos diferenciados em função do material predominante na formação no topo do perfil: conglomerados (*Cong*), arenitos (*Aren*) e material silto-argiloso (*Si-Ar*).

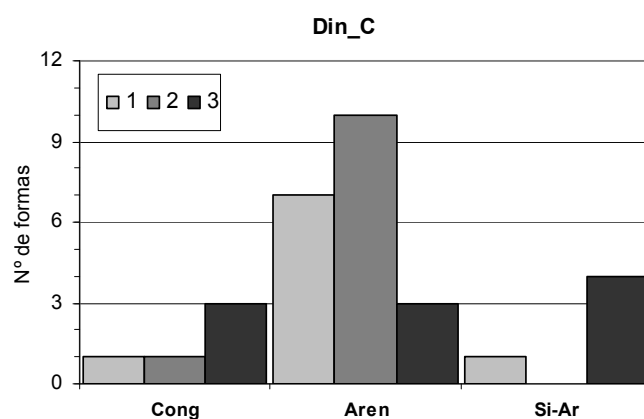


Figura 140 - Distribuição das formas por classe de dinâmica na cabeceira e contexto litológico. Classes de processo: cabeceira com acumulações de material erodido de declive relativamente suave apenas na base (<1/3 da parede), denotando actividade elevada (1); cabeceira com sector basal relativamente suave, constituído por depósitos e ocupando entre 1/3 e 2/3 da sua altura, denotando actividade reduzida (2); cabeceira dominada por depósitos com declives relativamente suaves e ocupando mais de 2/3 da sua altura, denotando actividade mínima ou nula (3). Contextos litológicos diferenciados em função do material predominante na formação no topo do perfil: conglomerados (*Cong*); arenitos (*Aren*); material silto-argiloso (*Si-Ar*).

Ao mesmo tempo, é de notar que todas as formações predominantemente areníticas apresentaram uma componente silto-argilosa superior a 20%¹²⁴, num dos casos apresentando mesmo intercalações com uma fracção silto-argilosa de 90% (Tabelas 100 e 101; Figuras 128 e 129). Esta componente textural justificaria a ocorrência de várias formas limitadas no topo

¹²⁴ Em termos do valor médio entre as amostras analisadas.

dos perfis por litologias dominadas por arenitos e ainda assim apresentando sistematicamente fragmentação por dessecação. Finalmente, é de notar que a topografia mostrou exercer influência sobre este processo (III.4.6.1), sendo potencialmente responsável pela sua não ocorrência em contextos litológicos que seriam, de outra forma, adequados.

Os resultados referentes à dinâmica na cabeceira (*Din_c*) são de interpretação menos evidente. Conforme a Figura 140 mostra, ocorrem formas com o grau mínimo de actividade (3) em associação a todos os três contextos litológicos. Ainda assim, a análise da Figura deixa claro que os perfis delimitados no topo por material silto-argiloso (*Si-Ar*) estão associados a um número maior de formas com um grau mínimo de actividade na cabeceira, e que a proporção representada por estas face a todas as formas no mesmo contexto litológico é superior. As formas na classe 3 caracterizam 80% de todas as formas com o topo do perfil delimitado por material silto-argiloso, 20% das formas delimitadas no topo por arenitos, e 60% das formas delimitadas no topo por conglomerados.

A relação entre cabeceiras com grau de actividade mínimo e material silto-argiloso pode ser interpretada como resultando das propriedades químicas e mecânicas do próprio material, designadamente a sua dispersividade e a tendência para a fragmentação ao longo de ciclos de humedecimento e dessecação. As redes de descontinuidades originadas (que adquirem dimensões muito variáveis) promovem uma resistência tangencial reduzida. Ao mesmo tempo promovem a infiltração, contribuindo para o aumento da massa do material e das tensões a que este está sujeito, para a ocorrência mais frequente de movimentos de massa e finalmente para a estabilização das cabeceiras sob o material acumulado.

Em contraste com os perfis limitados por materiais silto-argilosos, os perfis limitados por arenitos apresentam uma proporção muito maior de formas nas classes (1) e (2), evidenciando maiores graus de actividade. Embora uma possível explicação apontasse a maior resistência dos arenitos e a sua maior estabilidade face às variações no teor em água para justificar a menor acumulação de material basal indicativo de estabilização, a mesma não permitiria explicar o porquê de 60% das formas com perfis limitados por conglomerados se apresentarem com o grau mínimo de actividade. A litologia revela assim uma capacidade limitada para explicar o grau de actividade nas cabeceiras dos complexos de ravinas.

4.7. Evolução recente: 1970-2006

Com o propósito de complementar as análises anteriores relativas às componentes conceptuais do ravinamento (morfologia, processos, factores) e à sua articulação, procurou-se investigar a evolução geral do conjunto de 30 complexos de ravinas nas últimas décadas.

Recorreu-se a modelos numéricos de elevação (MNE) obtidos com base em estereorestituição de fotografias aéreas. Esta técnica tem sido frequentemente adoptada no estudo do ravinamento, permitindo não só conhecer a evolução das formas ao longo de intervalos temporais, mas também caracterizar a sua morfologia sem recorrer a levantamentos de campo custosos (e.g. Betts *et al.*, 2003; Daba *et al.*, 2003; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004; Parkner *et al.*, 2007).

Em ordem a caracterizar os complexos de ravinas na sua situação presente, utilizou-se o conjunto de pontos cotados restituído a partir da cobertura aero-fotográfica realizada em 2006 pela empresa Municipia S.A. para a Comunidade Intermunicipal da Lezíria do Tejo (vd.III.4.1.4). Uma vez que a observação de campo tornou claro que os complexos de ravinas se encontram relativamente pouco activos, considerou-se que os três anos decorridos entre a realização do vôo e o início do presente trabalho (2009) não implicaram qualquer perda relevante de actualidade. Adicionalmente, foi possível observar uma grande parte das formas em fotografias aéreas de 1958 (escala 1:26000, Instituto Geográfico do Exército), mostrando que ao longo dos mais de cinquenta anos decorridos desde o vôo a evolução foi mínima ou mesmo imperceptível, não obstante a fraca qualidade das imagens. Dois exemplos são apresentados na Figura 141.

Foi depois necessário encontrar uma cobertura anterior reunindo duas características: por um lado, estar separada da primeira por um intervalo temporal o mais longo possível, e por outro, ter uma qualidade relativamente elevada de forma a minimizar as diferenças de qualidade entre ambas as coberturas. Averiguou-se a disponibilidade de fotografia aérea da área de estudo contactando as duas instituições passíveis de a fornecer: o Instituto Geográfico do Exército (Igeo-E) e o Instituto Geográfico Português (IGP). Embora a informação mais antiga encontrada date de 1958 (disponível no Igeo-E, com uma escala de 1:26000) a qualidade das fotografias mostrou ser muito reduzida (Figura 141). Optou-se, conseqüentemente, por utilizar imagens de 1970, a preto e branco e com uma escala aproximada de 1:15000, disponíveis no IGP. Foi assim possível considerar a evolução das formas ao longo de um período relativamente longo de 36 anos (1970-2006).

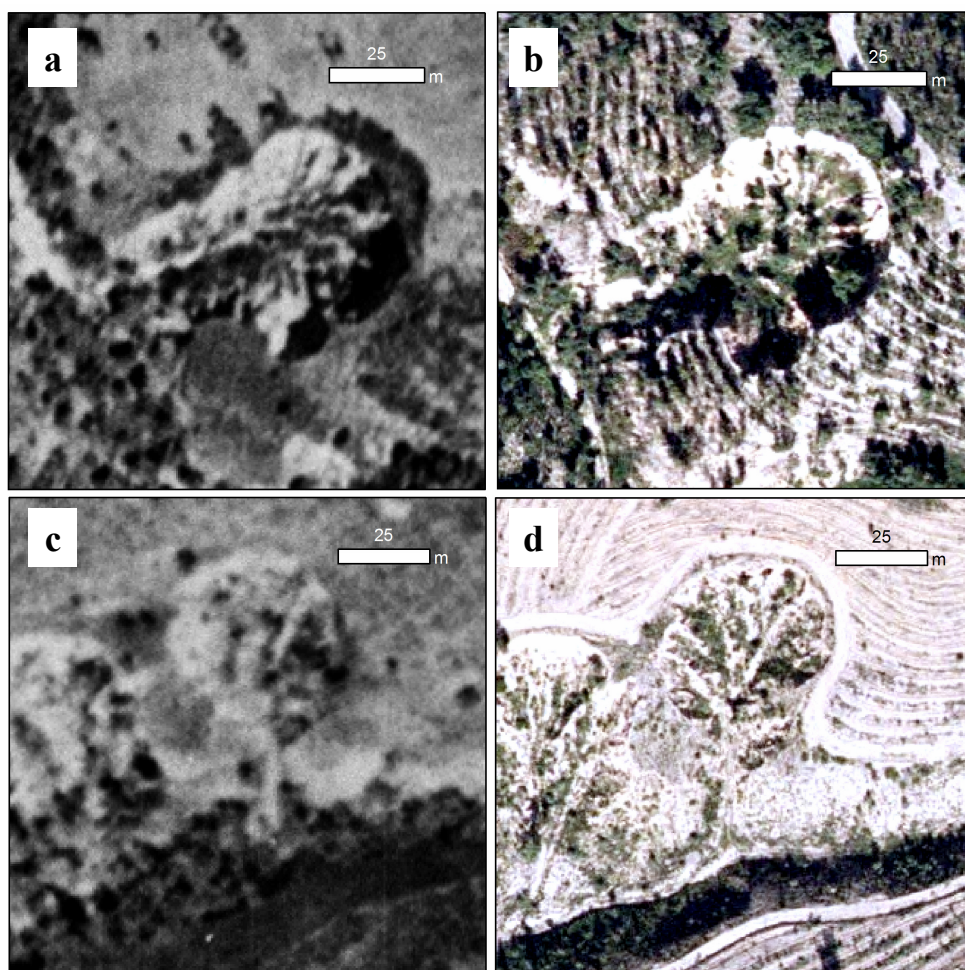


Figura 141 - Dois exemplos da reduzida evolução das formas ao longo de cerca de 48 anos. (a) e (c) representam as formas F18 e F20 numa fotografia aérea de 1958 (escala do voo 1:26000), enquanto (b) e (d) representam as mesmas duas formas nas fotografias aéreas de 2006 (escala 1:30000) cuja estéreo-restituição foi já descrita. Apesar da má qualidade das imagens mais antigas, a quase ausência de evolução é evidente.

As imagens de 1970 foram adquiridas na forma de diapositivos, digitalizadas com uma resolução de 12 *micra* e sujeitas a estéreo-restituição digital pela empresa Município S.A. Para a triangulação aérea do projecto, recorreu-se a um conjunto de pontos de apoio retirado do projecto de 2006 (já descrito em III.4.1.4). As fotografias foram agrupadas em seis blocos aerofotogramétricos, triangulados independentemente usando um mínimo de 12 e um máximo de 27 pontos. Em média, obtiveram-se por bloco Erros Médios Quadráticos horizontais de 0,33 m e verticais de 0,36 m.

Tal como em relação à informação de 2006, o resultado da estéreo-restituição foi um tema cartográfico de pontos cotados. Estes dois temas constituíram a base para todas as análises realizadas em ambiente SIG, descritas abaixo. Importa ressaltar que, inevitavelmente, as diferenças entre a informação para as duas datas (fotografias digitais a cores, fotografias

análogas a preto e branco) implicaram diferenças na qualidade da estéreo-restituição, já que os limites e a topografia interior dos sistemas de ravinas não são igualmente claros. Em todo o caso, pretendeu-se apenas estabelecer um padrão de evolução geral, pelo que se considerou estas diferenças sem relevância.

Procurou-se caracterizar as 30 formas em ambas as datas quanto à área e ao volume. No caso da informação de 2006, o volume já fora anteriormente obtido, tendo sido utilizado como uma das variáveis descritoras da morfologia dos complexos de ravinas em III.4.1.4. Obtiveram-se os valores de área mediante a sequência de procedimentos já adoptada na caracterização de um conjunto de 90 formas foto-interpretadas (vd. III.2.2.1).

Começou-se por construir um modelo TIN utilizando todos os pontos restituídos. Com base neste modelo, derivaram-se os declives e calculou-se o valor do seu co-seno. De seguida, e em acordo com as considerações já tecidas em III.2.2 acerca da assunção de topografia plana inerente à não consideração do declive, dividiu-se a área de cada célula ($0,01 \text{ m}^2$) pelo co-seno do declive, obtendo-se assim a área real da superfície representada por essa célula. Por último, utilizaram-se os polígonos com os limites das formas para somar os valores de área real das células correspondentes a cada complexo de ravinas¹²⁵.

As mesmas metodologias foram aplicadas em ordem a obter áreas e volumes a partir dos pontos estéreo-restituídos de 1970. Verificou-se, porém, que não foi possível distinguir claramente as secções de desembocadura de dois dos complexos de ravinas (F03 e F09), consequência da menor qualidade da informação fotográfica de base. Optou-se assim por excluir estas duas formas da análise.

Os resultados são apresentados na Tabela 122. As Figuras 142 e 143 mostram graficamente a relação entre as dimensões das formas em 1970 e a evolução verificada no período 1970-2006. A análise da Tabela 122 mostra claramente que houve crescimento na grande maioria dos casos, tanto em termos de volume (79% das formas) como de área (89% das formas). Em média, os complexos de ravinas aumentaram 12,6% em volume e 5,3% em área. Apenas uma proporção relativamente pequena das formas sofreu diminuição face aos valores originais.

¹²⁵ Recorreu-se à ferramenta *Zonal Statistics as Table*.

Tabela 122 - Evolução de 28 sistemas de ravinas em termos de área e volume durante o período 1970-2006. As diferenças em percentagem são expressas com relação ao valor de 1970. De forma a facilitar a análise, os valores negativos (diminuição de volume erodido e de área) foram evidenciados a cinzento.

Código	Volume (m ³)		Diferença (m ³)	Diferença (%)	Área (m ²)		Diferença (m ²)	Diferença (%)
	1970	2006			1970	2006		
F01	893,7	1236,7	343,0	38,4	462,10	457,76	-4,3	-0,9
F02	4189,1	5234,0	1044,9	24,9	1250,54	1349,39	98,9	7,9
F04	497,0	442,4	-54,5	-11,0	242,66	242,41	-0,2	-0,1
F05	23104,0	29154,0	6050,0	26,2	4126,09	4476,69	350,6	8,5
F06	2340,8	2384,9	44,1	1,9	1048,94	1080,35	31,4	3,0
F07	13169,1	15085,1	1916,0	14,5	2576,84	2877,50	300,7	11,7
F08	99650,3	105251,3	5601,0	5,6	10804,03	11285,07	481,0	4,5
F10	20012,3	23395,5	3383,2	16,9	3348,27	3601,57	253,3	7,6
F11	1640,6	1819,5	178,9	10,9	740,21	758,30	18,1	2,4
F12	7149,4	7899,3	749,9	10,5	2155,58	2193,24	37,7	1,7
F13	1774,1	1573,6	-200,4	-11,3	1037,61	1041,43	3,8	0,4
F14	1493,7	1585,5	91,8	6,1	853,32	932,44	79,1	9,3
F15	28418,6	33986,9	5568,3	19,6	4619,95	4927,14	307,2	6,6
F16	3411,6	3450,5	38,9	1,1	917,96	997,57	79,6	8,7
F17	1045,5	1799,0	753,5	72,1	683,67	734,53	50,9	7,4
F18	28505,7	31756,8	3251,1	11,4	3507,42	3808,64	301,2	8,6
F19	4175,7	4112,3	-63,4	-1,5	1377,34	1350,47	-26,9	-2,0
F20	11824,7	12045,3	220,6	1,9	2386,92	2473,33	86,4	3,6
F21	809,4	1010,1	200,7	24,8	438,88	460,263	21,4	4,9
F22	1990,3	1914,1	-76,2	-3,8	608,78	646,276	37,5	6,2
F23	2708,2	2858,6	150,5	5,6	1057,84	1165,88	108,0	10,2
F24	4865,0	4678,7	-186,3	-3,8	1266,01	1294,05	28,0	2,2
F25	1454,9	1394,9	-60,0	-4,1	549,40	599,69	50,3	9,2
F26	16074,1	19974,8	3900,7	24,3	5003,95	5614,83	610,9	12,2
F27	93471,5	109509,2	16037,7	17,2	13829,07	14348,1	519,0	3,8
F28	355,5	454,2	98,7	27,8	197,83	210,559	12,7	6,4
F29	2022,8	2447,7	424,9	21,0	980,85	994,539	13,7	1,4
F30	376405,8	398443,1	22037,3	5,9	32305,73	33343,4	1037,6	3,2
Média	26909,0	29460,6	2551,6	12,6	3513,5	3688,0	174,6	5,3
Máximo	376405,8	398443,1	22037,3	72,1	32305,7	33343,4	1037,6	12,2
Mínimo	355,5	442,4	-200,4	-11,3	197,8	210,6	-26,9	-2,0

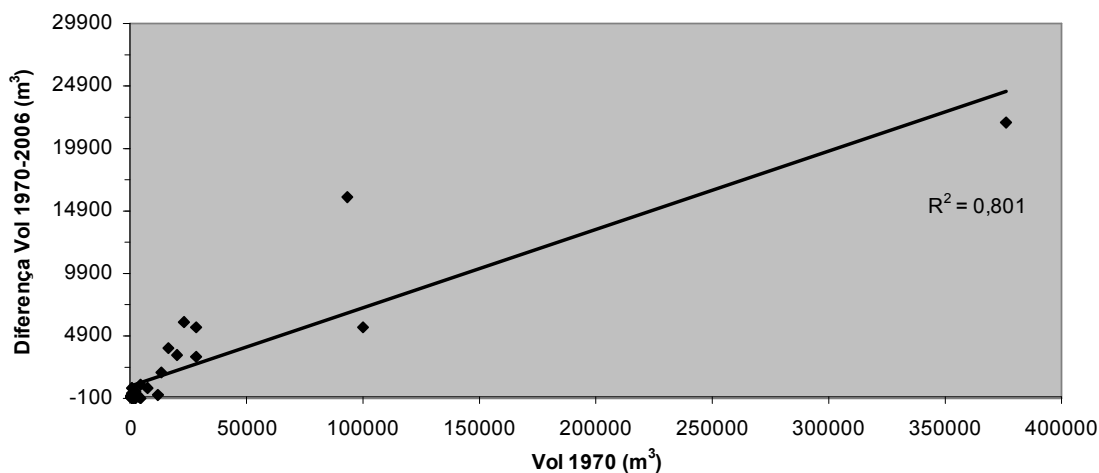


Figura 142 - Relação entre o volume dos sistemas de ravinas em 1970 e a sua evolução em volume no período 1970-2006.

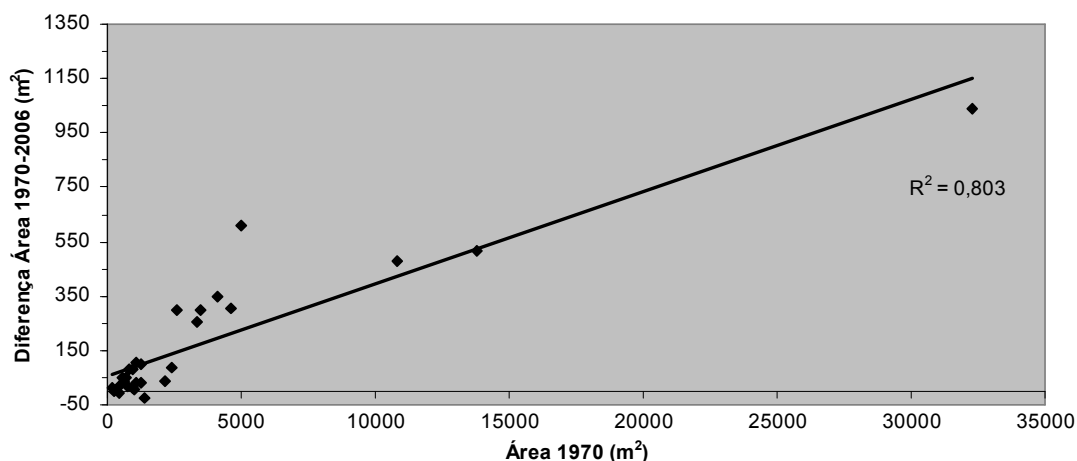


Figura 143 - Relação entre a área dos sistemas de ravinas em 1970 e a sua evolução em área no período 1970-2006.

É importante levar em conta que uma diminuição nas dimensões pode ser um indicador de medidas de remediação, como sejam o enchimento das formas com material ou a plantação de árvores no seu interior. A observação de campo realizada, porém, sugere que as medidas de remediação eventualmente levadas a cabo terão consistido apenas na plantação de eucaliptos no interior das formas e estarão associadas em exclusivo à forma F19, que apresenta sistematicamente eucaliptos com vários metros de altura no sector mais a montante do seu interior. No restante dos casos, os eucaliptos têm uma presença reduzida no interior das formas e ocorrem de forma desordenada em associação à vegetação arbustiva espontânea que domina os fundos. Uma interpretação mais plausível para as diminuições em volume parece portanto ser o assoreamento das formas¹²⁶. Dada a situação já descrita de desconexão dos sistemas de ravinas face às redes de drenagem das respectivas bacias, é de esperar que o material depositado no interior pelo escoamento proveniente de montante não tenha tido ao longo do tempo equivalência no material que deixou as desembocaduras, levando necessariamente ao assoreamento.

No caso da área, a diminuição pode ser interpretada como indicando revegetação de sectores das paredes menos declivosos (tornando-as semelhantes ao terreno envolvente e fazendo com que não tenham sido detectadas pelo operador que realizou a estéreo-restituição). Em todo o caso, as diminuições em área e/ou volume são claros indicadores de estabilização. O facto de apenas caracterizarem uma pequena minoria das formas confirma que, tal como já foi

¹²⁶ Em ordem a haver diminuição do volume é necessário que o material tenha provindo de montante, já que se resultasse de colapsos nas paredes ou cabeceira não haveria alteração no valor original.

sugerido com base na análise das relações entre variáveis morfológicas, a dinâmica actual é ainda de expansão, embora a taxas relativamente reduzidas¹²⁷.

A análise das Figuras 142 e 143 mostra que há uma clara e directa associação entre o crescimento durante o período considerado e as dimensões dos complexos de ravinas no início do mesmo período, o que sugere de imediato a extensão das cabeceiras e paredes como um factor relevante: maior superfície de parede e cabeceira acarretará maior probabilidade de colapsos, expansão em área e fornecimento de material facilmente mobilizável pelo escoamento. Ao mesmo tempo, foi já definida a importância fulcral da área de drenagem enquanto factor de desenvolvimento dos complexos de ravinas (vd. III.3.3.1; III.4.5.1). Uma vez que formas maiores revelaram possuir maiores áreas a montante a fornecer escoamento, as associações nas duas figuras reforçam a noção de que as formas de maiores dimensões ainda não atingiram um limiar de área de drenagem a montante em que esta se torne insuficiente para promover a expansão.

5. Os complexos de ravinas das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho: uma perspectiva integral

Em harmonia com os objectivos estabelecidos no início deste Capítulo III do trabalho, articularam-se os vários resultados anteriormente obtidos a fim de estruturar uma visão o mais abrangente e detalhada possível sobre os complexos de ravinas nas duas bacias em estudo. De forma a melhor contextualizar esta análise, a sequência de procedimentos levada a cabo é primeiramente recapitulada.

Começou-se por analisar uma amostra alargada de 90 complexos de ravinas a fim de conhecer as suas características morfológicas mais gerais (área, perímetro e sinuosidade; III.2.2 e III.2.3), localização no contexto das respectivas bacias (III.2.4), e os respectivos controlos (III.2.5 a III.2.8). Recorreu-se a regressão linear bivariada e múltipla em ordem a relacionar as três variáveis morfológicas entre si e com possíveis factores de controlo, e depois a regressão logística em ordem a averiguar a capacidade de um conjunto de factores para explicar a localização dos complexos de ravinas (III.3).

Após esta primeira análise mais geral¹²⁸, centrou-se a atenção numa amostra menor de 30 formas, agora estudadas em detalhe com base em levantamentos dGPS e estéreo-restituição

¹²⁷ Recorde-se que, aplicando o pressuposto da substituição de espaço por tempo, se observou que não há uma tendência para a diminuição do volume nas formas de maiores dimensões, e que portanto não há uma tendência detectável para os sistemas de ravinas assorearem com o crescimento (III.4.1.8.1; Figura 95 (b)).

fotogramétrica (III.4). Esta abordagem foi estruturada em termos das três grandes componentes conceptuais do ravinamento já propostas na primeira parte do trabalho: a morfologia, os processos e os factores de controlo destes últimos (vd. I.7).

No que diz respeito à morfologia, começou-se por estudar as relações bivariadas entre um conjunto de 30 características (III.4.1.8.1).

Em ordem a reduzir a complexidade da informação e a tornar viável a análise posterior das relações entre a morfologia e as numerosas variáveis associadas às outras componentes do ravinamento, recorreu-se a análise em componentes principais (III.4.1.8.2). Foi assim possível resumir a grande maioria da informação morfológica adoptando um conjunto de seis componentes principais.

Os processos evolutivos foram depois alvo de atenção, tendo sido caracterizados com base em levantamentos de campo (III.4.2). Dada a sua natureza qualitativa, foram relacionados com a morfologia através de análise discriminante (III.4.3).

Foi de seguida caracterizada a terceira componente conceptual do ravinamento: os potenciais factores de controlo dos vários processos (III.4.4). Estes foram relacionados com as seis componentes principais descritivas da morfologia usando duas técnicas alternativas: regressão linear bivariada (para os factores quantitativos, centrados na topografia pré-erosão; III.4.5.1), e análise discriminante (para a litologia, único factor qualitativo) (III.4.5.2).

Finalmente, centrou-se a atenção nas relações entre factores de controlo e processos. Tal como anteriormente, utilizaram-se técnicas distintas em função da natureza qualitativa ou quantitativa das variáveis em análise. Os processos (todos qualitativos) foram relacionados com os factores quantitativos (resumidos na forma de quatro componentes principais) através de análise discriminante (III.4.6.1), e com o único factor qualitativo (litologia) através do teste do Qui-Quadrado (III.4.6.2).

As análises e as técnicas estatísticas adoptadas são explicitadas graficamente em articulação com o enquadramento conceptual na Figura 144. Por último, procurou-se quantificar, ainda que de forma generalizada em função das limitações nos dados disponíveis, a evolução dos 30 sistemas de ravinas ao longo de um período de 36 anos (1970-2006).

Pretendeu-se, mediante a articulação dos resultados das várias etapas acima descritas, abordar os complexos de ravinas simultaneamente em termos de localização, morfologia, processos,

¹²⁸ Esta análise foi mais geral não só pelo número reduzido de variáveis adoptadas para caracterizar os complexos de ravinas, mas também pela generalização relativamente elevada inerente ao método usado para os medir (foto-interpretação).

factores e evolução temporal, estabelecendo assim uma perspectiva integral sobre estas formas, em oposição a uma perspectiva parcelar.

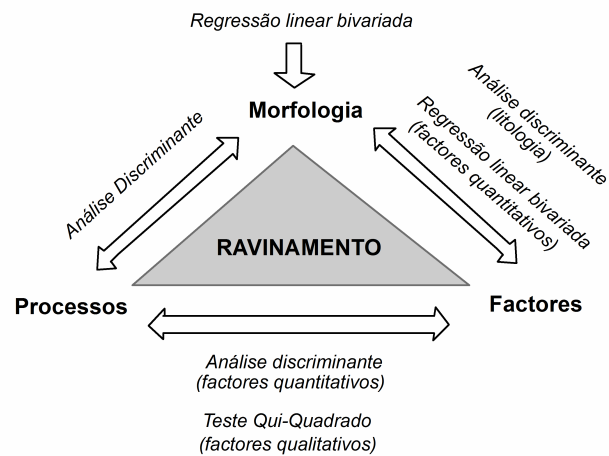


Figura 144 - As três componentes conceptuais do ravinamento adoptadas, e as técnicas utilizadas na análise das suas inter-relações.

De acordo com os resultados, os complexos de ravinas originaram-se a distâncias relativamente reduzidas da desembocadura das bacias e em locais de topografia relativamente declivosa, côncava em termos de perfil (e portanto promotora da desaceleração do escoamento), e com uma tendência para a acumulação de escoamento sub-superficial (elevado Índice Topográfico de Encharcamento). O facto adicional de a área de drenagem e o Índice de Potência do Escoamento não terem sido considerados significativos no modelo de regressão logística construído para prever a localização das desembocaduras das formas (assumidas como locais de iniciação; III.3.3.2) sugere que os factores de iniciação destas terão estado associados à dinâmica fluvial a jusante, por oposição ao escoamento erosivo proveniente de montante.

Após a iniciação, e à medida que as formas aumentavam em área, o seu desenvolvimento terá sido marcado por um predomínio do aumento em comprimento (sugerindo regressão das cabeceiras), seguido pela largura e depois pela profundidade, e indicando o desenvolvimento de uma morfologia relativamente alongada, com perfis transversais e longitudinais progressivamente mais suaves (III.4.1.8.1). Esta sequência foi acompanhada de um aumento progressivo em sinuosidade ao longo do perímetro, sugerindo bifurcação progressiva de cabeceiras. Ao mesmo tempo, foi nos sectores mais a montante que as formas desenvolveram os valores mais elevados de largura e profundidade ao longo do seu crescimento, reforçando a noção de uma dinâmica assente na regressão e bifurcação de cabeceiras.

A sequência de desenvolvimento morfológico proposta a partir das formas estudadas implica um aumento contínuo em profundidade e volume desde a iniciação, excluindo a hipótese de estas estarem presentemente numa fase de enchimento significativo.

Após o surgimento, o crescimento dos complexos de ravinas foi determinado essencialmente pela quantidade de escoamento convergindo para os seus locais de iniciação (i.e. desembocadura), com as formas em vertentes de declive relativamente suave e maior tendência para a acumulação de água sub-superficial (i.e. Índice Topográfico de Encharcamento mais elevado) a atingirem maiores dimensões (III.3.2.1; III.3.3.1; III.4.5.1). A associação entre crescimento mais acentuado, por um lado, e uma topografia pré-erosão de declives suaves e tendência para a infiltração e acumulação de escoamento sub-superficial, por outro, sugere uma dinâmica evolutiva assente em movimentos de massa nas paredes e cabeceiras, por oposição à erosão pelo escoamento superficial. Esta noção é reforçada pela sequência de evolução morfológica sugerida pelos dados, associada a perfis transversais e longitudinais progressivamente mais suaves (III.4.1.8.1).

Em paralelo com a relação entre topografia antecedente e dimensões, observou-se que os complexos de ravinas em topografias mais suaves desenvolveram perfis transversais tendencialmente mais suavizados e cabeceiras menos declivosas (III.4.5.1). Ao mesmo tempo, observou-se uma relação directa entre topografia antecedente longitudinalmente côncava (i.e. promovendo a desaceleração do escoamento e a infiltração) e um alargamento superior nos sectores das formas mais a montante, uma vez mais sugerindo relações importantes entre a morfologia dos complexos de ravinas e movimentos de massa potenciados por um teor elevado de água no rególito.

Foi ainda possível associar a tendência para o desenvolvimento de uma morfologia relativamente alongada com cabeceiras pouco declivosas a uma topografia antecedente promotora do escoamento superficial (i.e. com valores elevados de Índice de Potência do Escoamento e maior concavidade planar), sugerindo um predomínio do recuo e degradação das cabeceiras por oposição à sua bifurcação e expansão lateral.

Em paralelo com os efeitos da topografia antecedente, encontrou-se uma relação entre o contexto litológico e a morfologia dos complexos de ravinas (III.4.5.2), mostrando que as formas desenvolvidas sobre materiais silto-argilosos tendem a possuir perfis transversais suaves, profundidades menores, cabeceiras menos declivosas e perfis longitudinais relativamente côncavos. No que concerne aos processos físicos, esta relação sugere uma dinâmica marcada pela ocorrência relativamente frequente de movimentos de massa nas paredes e cabeceiras, promovidos pela natureza fortemente dispersiva determinada para as

duas formações silto-argilosas existentes (III.4.4.1.1) e pelo seu comportamento mecânico face ao humedecimento. É aqui de referir que apesar desta elevada dispersividade, o processo de tubulação ou *piping* só foi observado pontualmente. Não parece portanto ter qualquer relevância na morfodinâmica dos complexos de ravinas estudados.

Os resultados acima descritos sugerem conjuntamente que os actuais complexos de ravinas se terão desenvolvido com base na regressão e na expansão de cabeceiras em função de um entalhe nas duas ribeiras. Duas causas parecem plausíveis para este entalhe: (1) uma descida do nível de base das bacias (i.e. o Tejo), com a conseqüente propagação da erosão para montante, e (2) um período de precipitações excepcionais.

Ocorrendo destabilização das margens em função do entalhe do leito (e portanto gradientes hidráulicos e tensões mais elevadas), as formas ter-se-ão originado em locais relativamente declivosos e propensos à concentração do escoamento sub-superficial. Estas cabeceiras originais poderão ter sido as cabeceiras de linhas de água pré-existentes ou o produto de colapsos nas paredes de canais (i.e. ravinas de desnível) resultantes do próprio entalhe.

A partir do surgimento, a sua evolução foi determinada pela quantidade de água disponível a partir de montante, em particular sub-superficialmente, alimentando a bifurcação e o alargamento sucessivos e conduzindo finalmente aos grandes complexos de ravinas actuais.

Estabelecendo aqui uma ligação à sequência generalizada de desenvolvimento proposta na Parte II para os Padrões Gerais de Ravinamento (PGR) A a E (II.4.1; Figura 44) na totalidade da área de estudo, a sequência evolutiva definida acima para os complexos de ravinas nas duas bacias (correspondentes a PGR de tipo E) enquadra-se entre as fases na Figura 44 (c) e (d).

Tal como a Figura 44 (d) mostra, a situação actual caracteriza-se pelo assoreamento dos fundos das duas ribeiras, promovendo a desconexão dos complexos de ravinas face às respectivas redes de drenagem.

No que concerne aos processos (III.4.2), as formas apresentam os fundos estabilizados e dominados pela vegetação. Os canais existentes são descontínuos e relativamente incipientes, estando os complexos de ravinas essencialmente desconectados da rede de drenagem das bacias. Não se observaram elementos como *plunge-pools* ou sapas basais, que poderiam indicar um papel por parte do escoamento superficial na dinâmica actual. A actividade erosiva actual toma a forma de movimentos de massa e concentra-se nas paredes e cabeceiras, onde muitas formas apresentam extensões significativas sem vegetação e configurações relativamente verticais, bem como depósitos basais de material e árvores parcialmente desenraizadas. Exemplos são apresentados nas Figuras 29 (b) e 42 (b).

As relações entre morfologia e processos (III.4.3) mostraram que os complexos de ravinas com perfis transversais mais entalhados e cabeceiras mais declivosas tendem a apresentar cabeceiras e paredes mais activas e menos vegetadas. Em paralelo, determinou-se uma tendência para as formas com dimensões menores apresentarem maior grau de actividade e menos vegetação nas paredes. Juntamente com a associação directa já descrita entre dimensões e o desenvolvimento de uma morfologia com perfis transversais e cabeceiras relativamente suaves, estes resultados sugerem que os complexos de ravinas apresentarão maior grau de actividade numa fase inicial, com esta a reduzir-se à medida que as formas se expandem.

Ainda com respeito às dimensões, definiu-se uma associação entre formas maiores e maior tendência para a ocorrência sistemática de *fluting*. Esta relação poderá, pelo menos em parte, ser explicada pela maior extensão das paredes e cabeceiras, possibilitando a geração de escoamento com maior magnitude e poder erosivo.

A ocorrência sistemática de fracturas de dessecação ao longo do perímetro mostrou estar associada a formas com perfis transversais mais suaves e cabeceiras menos declivosas. Este resultado veio complementar a associação já descrita entre morfologia e material silto-argiloso (III.4.5.2) e foi, por sua vez, complementado pela associação definida entre a presença deste material e a ocorrência de fragmentação por dessecação (III.4.6.2). Conjuntamente, parecem traduzir um controlo por parte do contexto litológico sobre os processos e, subsequentemente, sobre a morfologia dos complexos de ravinas. A natureza expansiva das argilas presentes promoverá a fragmentação ao longo de ciclos de humedecimento e dessecação sucessivos, reduzindo a resistência tangencial do material e promovendo a infiltração e a ocorrência de elevados teores em humidade. Este mecanismo associar-se-á à dispersividade e ao comportamento mecânico das argilas face ao humedecimento para promover a ocorrência relativamente frequente de colapsos nas paredes e cabeceiras, contribuindo para o desenvolvimento da morfologia acima descrita.

Para além do controlo litológico, foi ainda possível estabelecer um controlo topográfico sobre o processo de fragmentação por dessecação (III.4.6.1): o processo caracteriza sistematicamente complexos de ravinas evoluindo em topografias promotoras da infiltração e da dispersão do escoamento (i.e. com declives reduzidos e curvatura planar relativamente elevada), onde são expectáveis ciclos sucessivos de humedecimento e dessecação do rególito ao longo do tempo.

A análise discriminante deixou clara uma associação entre a ocorrência de fracturas de tensão ao longo dos perímetros das formas e uma morfologia específica: alongada, relativamente

pouco alargada a montante face a jusante, e com declives relativamente reduzidos nas cabeceiras. Nem a dimensão das formas nem o seu grau de entalhe mostraram associação com o processo, implicando que a altura e a inclinação das paredes não exercerão um efeito relevante. Ao mesmo tempo, não se encontraram relações entre este processo e quaisquer factores (III.4.6.1; III.4.6.2), pelo que não foi possível interpretar a associação encontrada em termos de mecanismos físicos.

Foi ainda possível definir uma associação significativa entre o contexto litológico e a dinâmica na cabeceira (III.4.6.2). Embora este resultado tenha sugerido um papel por parte do comportamento químico e mecânico das formações silto-argilosas (promovendo uma acumulação basal relativamente acentuada conducente à estabilização) não permite explicar a estabilização da maioria das cabeceiras delimitadas no topo por conglomerados (i.e. com um teor mínimo em material silto-argiloso), evidenciando as limitações do contexto litológico enquanto factor de controlo único.

Finalmente, e após a consideração das inter-relações entre morfologia, processos e factores, a análise da evolução dos complexos de ravinas em termos de volume e área durante o período 1970-2006 (III.4.7) mostrou que maioria das formas (respectivamente 79% e 89%) cresceu em ambas as variáveis. A variação percentual observada face às dimensões em 1970 foi, em média, de 12,6% (volume) e 5,3% (área). Apenas uma pequena parte dos complexos de ravinas sofreu diminuição nas dimensões, sugerindo enchimento com material coluvial proveniente de montante e, possivelmente, medidas de remediação.

Observou-se uma forte relação directa entre a dimensão das formas em 1970 e o crescimento apresentado ao longo dos 36 anos seguintes, mostrando que os maiores complexos de ravinas foram os que cresceram mais. A articulação deste resultado com as relações já estabelecidas entre dimensões e área de drenagem na desembocadura e entre área e volume ao longo do crescimento indica que as formas maiores não atingiram ainda um limiar hipotético de área de drenagem a partir do qual não é produzido escoamento suficiente para alimentar o crescimento. Continuam, portanto, em expansão.

CONCLUSÕES FINAIS

CONCLUSÕES FINAIS

Pretendeu-se, com o trabalho que agora se conclui, contribuir para o conhecimento da erosão do solo por ravinamento. Tendo por fundo este objectivo geral, procurou-se cumprir sucessivamente três objectivos específicos:

- (1) Desenvolver um enquadramento teórico e conceptual para o fenómeno e para as formas resultantes coerente com a literatura publicada internacionalmente;
- (2) Diferenciar e caracterizar os grandes padrões apresentados pelo fenómeno ao longo de uma área relativamente extensa situada na margem esquerda da bacia portuguesa do Tejo, analisando as suas relações face a diferentes factores de controlo.
- (3) Caracterizar em pormenor as formas numa sub-área de estudo mais restrita, investigando não só as relações entre morfologia, processos, e factores de controlo de uma forma integrada, mas também a evolução ocorrida nas últimas décadas.

A investigação levada a cabo permitiu estabelecer conclusões relativas a cada uma das suas três partes constituintes, em consonância com os três objectivos acima referidos. Estas conclusões serão agora enumeradas e contextualizadas face à sequência metodológica realizada.

A variabilidade morfológica e processual associada ao ravinamento não é compatível com o enquadramento conceptual vigente, que encara o surgimento e desenvolvimento de ravinas como a formação e crescimento de canais por processos essencialmente hídricos (I.6). Esta visão estará relacionada, pelo menos em parte, com a atenção que tem sido concedida ao estudo de ravinas incipientes em detrimento das formas mais desenvolvidas e dos sistemas em que estas se conjugam.

O ravinamento deve ser abordado como um fenómeno misto, ou seja o resultado da articulação entre a acção do escoamento e a ocorrência de movimentos de massa. Enquanto forma do relevo, uma ravina pode ser conceptualizada como um sistema assente na conjugação entre morfologia, processos e factores de controlo, uma conjugação por natureza variável ao longo do tempo e sujeita a limiares geomórficos, aqui entendidos essencialmente como Schumm (1979) os definiu: limiares de estabilidade excedidos devido a mudanças intrínsecas das próprias formas do relevo, ou devido a mudanças de variáveis externas, sejam estas progressivas ou abruptas.

A evolução de ravinas, simples ou organizadas em sistemas, não implica necessariamente estabilização com a diminuição progressiva da área de drenagem, mas pode, através de

expansão e bifurcação sucessivas, originar áreas extensas de topografia densamente degradada, estabelecendo assim a transição entre os domínios teóricos do ravinamento e da dinâmica de *badlands*. Neste contexto, adquire particular importância o estudo dos sistemas de ravinas (em rede e em complexo) e da sua dinâmica evolutiva.

As considerações tecidas na Parte I permitiram definir cinco questões gerais de natureza teórica consideradas particularmente relevantes para investigação futura (I.6).

Na Parte II do trabalho, e usando como base o enquadramento conceptual resultante da Parte I, procurou-se definir, diferenciar e caracterizar os padrões assumidos pelo ravinamento numa área de estudo relativamente extensa, abrangendo aproximadamente 2912 km² na margem esquerda da bacia do Baixo Tejo (II.1).

A caracterização de 55 áreas-amostra permitiu identificar oito Padrões Gerais de Ravinamento (PGR) na área de estudo (II.3.1), revelando grande variabilidade em termos de escala espacial e temporal e de processos evolutivos, e abrangendo desde formas incipientes até complexos de ravinas com mais de três hectares de extensão contínua.

O sector mais a norte na área de estudo foi marcado pelo entalhe relativamente profundo dos cursos de água e pelo alargamento dos vales resultantes, correlativos em termos litológicos com o recuo dos mantos de conglomerados da superfície culminante e a exposição progressiva de materiais relativamente brandos. Esta sequência forneceu o enquadramento espacial para os PGR marcados por formas de grandes dimensões, em rede e em complexos. Destas formas, a maioria encontra-se inactiva, sendo excepções grandes complexos de ravinas, parcialmente activos.

O sector mais meridional da área de estudo apresenta uma topografia mais suave e dissecada pela drenagem, onde os conglomerados da superfície culminante apenas subsistem no topo das elevações. Os declives menores e o afloramento mais extensivo de materiais mais brandos fornecem o contexto para os PGR apresentando formas mais incipientes, de carácter linear, e na sua maioria parcial ou totalmente activas.

Procurou-se relacionar as diferenças entre as formas nos diferentes PGR com possíveis factores de controlo, embora a escala da informação cartográfica utilizada (1:25000 no caso dos solos e da topografia, 1:50000 para a litologia; 1:100000 como base para a cartografia de uso do solo) implique necessariamente resultados muito generalizados e com um carácter essencialmente indicativo (II.3.2).

As formas hectométricas dos PGR no sector norte da área de estudo apenas foram comparadas quanto à litologia onde ocorrem, dado que as suas dimensões invalidam um controlo relevante por parte de qualquer um dos outros factores considerados (Índice Topográfico de

Encharcamento, Índice de Potência do Escoamento, tipo de solo, uso do solo) (II.4.1.1). As diferenças nos contextos litológicos encontradas permitiram associar a estes padrões diferentes contextos topográficos, relacionados com a evolução da drenagem na área de estudo. Estes sugerem conjuntamente uma sequência evolutiva que, embora muito generalizada, poderá constituir um enquadramento de partida para investigações mais detalhadas no futuro (Figura 44).

No caso das formas mais incipientes associadas aos PGR no sector sul da área de estudo (II.4.1.2), não foi possível estabelecer diferenciações com base em qualquer dos factores considerados. Muito possivelmente a generalização excessiva da informação cartográfica utilizada e as dimensões relativamente pequenas das ravinas terão invalidado a obtenção de resultados mais objectivos. Esta noção é sustentada pelo facto de a observação de campo ter tornado clara a natureza topograficamente controlada das formas, em contraste com a incapacidade dos índices topográficos utilizados para diferenciar formas mais e menos entalhadas. É ainda de referir que, embora o uso do solo não tenha permitido diferenciar PGR, as observações realizadas sugerem uma relação com o ravinamento, dado que a maioria das formas tende a estar associada a usos que implicam alguma forma de mobilização periódica do solo (II.4.1.2).

Juntamente com os oito PGR referidos, observou-se a ocorrência sistemática de ravinas em associação a elementos antrópicos na área de estudo (estradas, canais de drenagem, quebras na topografia), identificadas como um tópico relevante para investigação futura (II.4.2).

Articulando o enquadramento teórico com a observação extensiva de campo levada a cabo, chamou-se a atenção para a importância da dinâmica das cabeceiras enquanto componente fundamental no ravinamento (II.4.3), não só no surgimento e evolução das formas simples, mas também nas transições entre formas simples e sistemas (em rede e/ou complexo) e na evolução posterior destes últimos.

Na terceira parte do trabalho realizou-se uma transição de escala de análise. Deixou-se para trás a perspectiva generalizada que caracterizou a Parte II e adoptou-se uma abordagem de pormenor. Das áreas anteriormente definidas como prioritárias para investigação futura (vd. II.5), optou-se por centrar a atenção nas bacias adjacentes das ribeiras de Ulme e do Vale do Casal Velho, caracterizadas pela maior concentração de grandes complexos de ravinas observada em toda a área de estudo.

As análises realizadas organizaram-se em duas fases.

A primeira fase configurou uma análise de âmbito mais geral, centrando-se a atenção num número maior de formas com um grau menor de detalhe (III.2). Começou-se por seleccionar

um conjunto de 90 complexos de ravinas, vectorizados em ambiente SIG a partir de ortofotos e depois analisados com vista a procurar relações entre localização, morfologia geral e um conjunto de factores de controlo. Estes últimos incluíram a área de drenagem medida na desembocadura das formas, a distância à desembocadura da bacia, um indicador hipotético de grau de desenvolvimento e uma série de 12 parâmetros topográficos descritivos da topografia pré-erosão (Tabela 57). Em ordem a reconstruir a topografia que precedeu os complexos de ravinas, propôs-se uma metodologia nova incluindo validação das superfícies interpoladas, ao contrário do que tem sido realizado na literatura (III.2.5.1).

Recorreu-se nas análises a regressão linear simples (conjugada com o ajustamento de funções bivariadas não-lineares), regressão linear múltipla e regressão logística.

De forma integrada nesta fase da investigação, explorou-se o tópico da subestimação inerente à não consideração do declive em medições lineares e areais de formas do relevo (III.2.2). Embora não estando directamente relacionada com os objectivos do trabalho, optou-se por abordar esta questão devido à sua recorrência implícita nas metodologias descritas na literatura sobre o ravinamento e ao seu potencial para constrangir a objectividade dos resultados obtidos. A não consideração do declive em medições areais e lineares produziu na área estudada subestimações frequentemente superiores a 10% das dimensões reais das formas, com máximos acima dos 20%. Estes valores são sistematicamente mais elevados para as áreas do que para os perímetros, com a magnitude do erro aumentando com os declives das áreas em estudo e com a escala da informação altimétrica adoptada. Dado que contextos topográficos semelhantes ao das duas bacias estudadas são relativamente comuns na literatura (cf. Tabela 46), pode assumir-se que valores desta ordem o serão igualmente. Concluiu-se assim que a consideração dos declives nos cálculos das dimensões deveria ser uma prática generalizada.

Numa segunda etapa (III.4), seleccionou-se um sub-conjunto de 30 formas a partir do conjunto de 90 acima referido com o propósito de estabelecer uma caracterização o mais detalhada possível, assim complementando os resultados da primeira etapa. Este sub-conjunto foi caracterizado quanto a cada uma das três componentes conceptuais do ravinamento segundo o enquadramento teórico proposto (I.6): morfologia (através de um levantamento com GPS e estéreo-restituição fotogramétrica; III.4.1), processos (através de levantamento de campo; III.4.2) e factores de controlo (incluindo, para além da área de drenagem medida na desembocadura das formas e de doze variáveis relativas à topografia pré-erosão, a caracterização dos contextos litológicos das formas com recurso a análises laboratoriais; III.4.4). Estas componentes foram analisadas e relacionadas entre si usando técnicas distintas

consoante a natureza qualitativa ou quantitativa dos dados (Figura 144): análise discriminante, regressão linear simples (incluindo o ajustamento de funções não-lineares) e o teste do Qui-quadrado. Quantificou-se adicionalmente a evolução de 28 das 30 formas ao longo do período 1970-2006 através da comparação de modelos numéricos de elevação (III.4.7).

Pretendeu-se, com a integração das duas fases acima descritas, obter na terceira parte do trabalho uma visão abrangente e ao mesmo tempo o mais detalhada possível sobre o fenómeno dos complexos de ravinas nas duas bacias estudadas.

De acordo com os resultados obtidos, as formas ter-se-ão originado em função do entalhe da rede de drenagem das bacias, em locais relativamente declivosos e propensos à infiltração e acumulação do escoamento sub-superficial (III.3.3.3). Após o surgimento, o seu crescimento foi determinado essencialmente pela quantidade de escoamento convergindo a partir de montante (III.3.31; III.4.5.1).

A análise das relações entre as variáveis utilizadas na caracterização morfológica dos complexos de ravinas permitiu estabelecer uma sequência evolutiva geral: à medida que as formas aumentam em área, o seu desenvolvimento é marcado por um predomínio do aumento em comprimento, seguido pela largura e depois pela profundidade, e indicando o desenvolvimento de uma morfologia relativamente alongada, com perfis transversais e longitudinais progressivamente mais suaves (III.4.1.8.1). Ao longo do crescimento, os valores máximos de largura e profundidade são atingidos nos sectores mais a montante, sendo a evolução acompanhada de um aumento progressivo em sinuosidade ao longo do perímetro dos complexos de ravinas. Estes resultados foram interpretados como indicando uma dinâmica evolutiva geral centrada nos sectores de cabeceira e marcada por bifurcação progressiva.

A análise das relações entre variáveis morfológicas mostrou ainda não haver diminuição do volume ou profundidade com o aumento em área (Figura 95), contrariando a hipótese de as formas se encontrarem presentemente numa fase de enchimento.

Ao longo do seu desenvolvimento, as formas em vertentes de declives relativamente suaves (e portanto maior tendência para a acumulação de água sub-superficial) atingiram maiores dimensões (III.3.2; III.4.5.1). Esta relação sugere uma evolução dominada por movimentos de massa nas paredes e cabeceiras e é reforçada pela sequência de evolução morfológica sugerida pelos dados (prevendo perfis transversais e longitudinais progressivamente mais suaves).

Os complexos de ravinas evoluindo em topografias com declives menores desenvolveram perfis transversais tendencialmente mais suavizados e cabeceiras menos declivosas (III.4.5.1). Observou-se também uma relação directa entre topografia antecedente longitudinalmente

côncava (promovendo a desaceleração do escoamento e a infiltração) e um alargamento superior nos sectores das formas mais a montante. Ambos estes resultados sugerem um controlo sobre a morfologia por parte da topografia antecedente, e assente no teor de água no rególito e respectivos efeitos sobre a potenciação da ocorrência de colapsos.

Em contraste, foi possível associar a tendência para o desenvolvimento de uma morfologia relativamente alongada com cabeceiras pouco declivosas a uma topografia antecedente promotora do escoamento superficial (valores elevados de Índice de Potência do Escoamento e maior concavidade planar), sugerindo um predomínio do recuo e degradação das cabeceiras por oposição à sua bifurcação e expansão lateral.

No que concerne à sua actividade actual e processos de evolução, os complexos de ravinas encontram-se essencialmente desconectados das redes de drenagem das respectivas bacias (III.4.2). Apresentam os fundos estabilizados e dominados pela vegetação, sendo os canais existentes descontínuos e relativamente incipientes. Não há sinais de qualquer relevância por parte do escoamento superficial (e.g. *plunge-pools*, sapas na base das paredes), estando a dinâmica actual concentrada nas paredes e cabeceiras na forma de movimentos de massa.

Os resultados da articulação entre morfologia e processos sugerem que os complexos de ravinas apresentarão maior grau de actividade numa fase inicial, com esta a reduzir-se à medida que as formas se expandem (III.4.3).

As formas desenvolvidas sobre formações silto-argilosas tendem a apresentar perfis transversais suaves, profundidades menores, cabeceiras menos declivosas e perfis longitudinais relativamente côncavos (III.4.5.2), bem como menor grau de actividade nas cabeceiras (III.4.6.2). Estas formações mostraram-se associadas à ocorrência de fragmentação por dessecação (III.4.6.2), bem como à presença de argilas com elevada dispersividade (III.4.4.1.1; Figura 126). Estes resultados sugerem que a natureza expansiva das argilas presentes promoverá a fragmentação ao longo de ciclos de humedecimento e dessecação sucessivos, reduzindo a resistência tangencial do material e promovendo a infiltração e a ocorrência de elevados teores em humidade. Este mecanismo associar-se-á à dispersividade e ao comportamento mecânico das argilas face ao humedecimento para promover a ocorrência relativamente frequente de colapsos nas paredes e cabeceiras e o desenvolvimento da morfologia referida, promovendo a estabilização. É aqui importante referir que, apesar da dispersividade das argilas, o processo de tubulação ou *piping* só foi observado pontualmente, não aparentando qualquer relevância no contexto estudado.

Para além da relação com a expansibilidade das argilas, a fragmentação por dessecação mostrou-se sujeita a um controlo topográfico, estando associada a topografias promotoras da

infiltração e da dispersão do escoamento (declives reduzidos e curvatura planar relativamente elevada), onde são expectáveis ciclos sucessivos de humedecimento e dessecação do rególito ao longo do tempo (III.4.6.1).

O processo de *fluting* tende a ocorrer sistematicamente em formas de grandes dimensões, associação que parece resultar, pelo menos em parte, da maior extensão das paredes e cabeceiras, possibilitando a geração de escoamento com maior magnitude e poder erosivo (III.4.3).

Por último, a análise da evolução dos complexos de ravinas em termos de volume e área durante o período 1970-2006 (III.4.7) mostrou que a maioria das formas cresceu em ambas as variáveis, sendo a variação percentual observada face às dimensões em 1970, em média, de 12,6% (volume) e 5,3% (área). Verificou-se uma forte relação directa entre a dimensão das formas em 1970 e o crescimento apresentado ao longo dos 36 anos seguintes. A articulação deste resultado com as relações já estabelecidas entre dimensões e área de drenagem na desembocadura e entre área e volume ao longo do crescimento indica que as formas maiores não atingiram ainda um limiar hipotético de área de drenagem a partir do qual não é produzido escoamento suficiente para alimentar o crescimento, continuando em expansão.

Em suma, o estudo relativamente detalhado dedicado na terceira parte do trabalho aos complexos de ravinas permitiu integrar morfologia, processos e respectivos factores de controlo, evidenciando o papel das suas interacções na evolução das formas. Foi possível estabelecer controlos sobre o seu surgimento e evolução geral, bem como definir uma sequência de evolução morfológica e estabelecer, com base nesta, inferências relativas aos processos evolutivos.

Os resultados confirmaram a importância dos movimentos de massa enquanto componente fundamental do ravinamento, já acentuada na revisão bibliográfica da primeira parte. Vieram também reforçar a noção de que a dinâmica das cabeceiras desempenha um papel crítico na evolução e diversificação das formas, noção já defendida com base na caracterização regional da Parte II (II.4.3).

Em paralelo com a associação sugerida entre o seu surgimento e um entalhe por parte da drenagem, a observação de campo sugeriu relações entre a actual estabilização parcial das formas e o assoreamento dos leitos das duas ribeiras, relações consideradas ainda na Parte II do trabalho (II.4.1.1). Embora a integração entre morfologia, processos e factores tenha contribuído para o conhecimento dos complexos de ravinas e da sua evolução, não permitiu todavia associar-lhe qualquer componente temporal. Neste contexto, será extremamente relevante o estabelecimento futuro de uma cronologia para a erosão e sedimentação

associadas a estas formas, permitindo enquadrar temporalmente o seu surgimento, quantificar e diferenciar taxas de evolução ao longo do tempo, e procurar os factores de controlo por detrás da sua iniciação, desenvolvimento e condição actual.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

Abrahams, A.D.; Parsons, A.J.; Hirsch, P.J. (1992) – *Field and laboratory studies of resistance to interrill overland flow on semi-arid hillslopes, Southern Arizona*. In, Parsons, A.J.; Abrahams, A.D. – *Overland Flow – Hydraulics and Erosion Mechanics*. Routledge

Agassi, M.; Shainberg, I.; Morin, J. (1981) – *Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation*. Soil Science Society of America Journal, 45: 848-851

Alexander, D. (1982) – Difference between “calanchi” and “biancane” badlands in Italy. In Bryan, R.; Yair, A. (Eds.) – *Badland Geomorphology and Piping*. GeoBooks. Pp.71-87

Alexander, R.W.; Calvo-Cases, A.; Arnau-Rosalén, E.; Mather, A.E.; Lázaro-Suau, R. (2008) – *Erosion and stabilization sequences in relation to base level changes in the El Cautivo badlands, SE Spain*. *Geomorphology* 100: 83-90

Alvarez-Arbesú, R.; Felicísimo, A. (2002) - GIS and logistic regression as tools for environmental management: a coastal cliff vegetation model in Northern Spain. In Brebbia, C.A.; Pascolo, P. (Eds.) - *Management Information Systems 2002: GIS and Remote Sensing*. Wessex Institute of Technology Press: 215-224.

Anderson, M.G.; Burt, T.P. (1978) - *The role of topography in controlling throughflow generation*. *Earth Surface Processes* Vol. 3: 331-344

Avni, Y. (2005) – *Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel*. *Catena* 63: 185-220

Bacellar, L. de A.P.; Coelho Netto, A.L.; Lacerda, W.A. (2005) – *Controlling factors of gullying in the Maracujá catchment, Southeastern Brazil*. *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 1369-1385

Barbosa, B. P. (1995) - *Alostratigrafia e Litostratigrafia das Unidades Continentais da Bacia Terciária do Baixo Tejo. Relações com o Eustatismo e a Tectónica*. Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Ben-Hur, M; Shainberg, I.; Bakker, D.; Keren., R. (1985) – *Effect of soil texture and CaCO₃ content on water infiltration in crusted soils as related to water salinity*. Irrigation Science 6: 281-284

Bergonse, R.; Bidarra, J. (2010) - *Probabilidade bayesiana e regressão logística na avaliação da susceptibilidade de ocorrência de incêndios de grande magnitude*. Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia, Vol. XLV, nº 89: 79-104

Betts, H.D.; Trustrum, N.A.; De Rose, R.C. (2003) – *Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management*. Earth Surface Processes and Landforms 28: 1043-1058

Billi, P.; Dramis, F. (2003) – *Geomorphological investigation on gully erosion in the Rift Valley and the northern highlands of Ethiopia*. Catena 50: 353-368

Blanco, H.; Lal, R. (2008) – *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer. 617 pp.

Blong, R.J.; Graham, O.P.; Veness, J.A. (1982) – *The role of sidewall processes in gully development; some N.S.W. examples*. Earth Surface Processes and Landforms vol.7: 381-385

Boardman, J. (1992): The current on the south Downs: implications for the past. In: Bell, M.; Boardman, J. (eds.): *Past and Present Soil Erosion*. Oxbow Monograph 22, Oxford. Pp 9-20

Boardman, J.; Parsons, A.J.; Holland, R.; Holmes, P.J.; Washington, R. (2003) – *Development of badlands and gullies in the Sneeuberg, Great Karoo, South Africa*. Catena 50: 165-184

Boardman, J.; Poesen, J. (2006) – *Soil Erosion in Europe: Major Processes, Causes and Consequences*. In Boardman, J.; Poesen, J. (Eds.) – *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons. Pp. 479-487

Bocco, G. (1991) – *Gully erosion: processes and models*. Progress in Physical Geography 15, 4: 392-406

Boix-Fayos, C.; Calvo-Cases, A.; Imeson, A.C.; Soriano-Soto, M.D. (2001) – *Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators*. Catena 44: 47-67

- Bork, H.R. (1989) – Soil erosion during the past millennium in Central Europe and its significance within the geomorphodynamics of the Holocene. In Ahnert, F. (Ed.) - *Landforms and Landform Evolution in West Germany*. Catena Supplement 15: 121-131
- Borselli, L.; Torri, D.; Oygarden, L.; De Alba, S.; Martínez-Casasnovas, J.A.; Bazzoffi, P.; Jakab, G. (2006) – Land Levelling. In Boardman, J.; Poesen, J. (Eds.) – *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons. Pp. 643-658
- Bossard, M; Feranec, J.; Otahel, J. (2000) - *CORINE land cover technical guide - Addendum 2000*. European Environmental Agency. 105 pp.
- Bou Kheir, R.; Wilson, J.; Deng, Y. (2007) – *Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon*. Earth Surface Processes and Landforms 32: 1770-1782
- Bouchnak, H.; Felfoul, M.S.; Boussema, M.R.; Smane, M.H. (2009) – *Slope and rainfall effects on the volume of sediment yield by gully erosion in the Souar lithologic formation (Tunisia)*. Catena 78: 170-177
- Bradford, J.M.; Piest, R.F. (1980) – Erosional development of valley-bottom gullies in the upper midwestern United States. In Coates, D.R.; Vitek, J.D. (Eds.) – *Thresholds in Geomorphology*. George Allen & Unwin. Pp. 75-101
- Brady, N.C.; Weil, R. R. (2008) – *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.
- Bresson, L.; Le Bissonais, Y.; Andrieux, P. (2006) – *Soil surface crusting and structure slumping in Europe*. In, Boardman, J. ; Poesen, J. (Eds.) – *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons. Pp. 489-500
- Brice, J.B. (1966) – *Erosion and deposition in the loess-mantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, Nebraska*. U.S.Geological Survey Professional Paper 352H, pp.235-339.
- Brito, R.S. (2005) - *Clima e suas influências*. In, Julião, R.P.; Fernandes, J.N. (Coords.) - *Atlas de Portugal*. Instituto Geográfico Português. Pp. 50-65
- Brooks, A.P.; Shellberg, J.G.; Knight, J.; Spencer, J. (2009) – *Alluvial gully erosion: an example from the Mitchell fluvial megafan, Queensland, Australia*. Earth Surface Processes and Landforms 34: 1951-1969

Bryan, R. (2000) – *Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope*. *Geomorphology* 32: 385-415

Bryan, R.B.; Poesen, J. (1989) – *Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development*. *Earth Surface Processes and Landforms* vol.14: 211-231

Bryan, R.B.; Jones, J.A.A. (1997) – *The significance of soil piping processes: inventory and prospect*. *Geomorphology* 20: 209-218

Bryan, R.B.; Rockwell, D.L. (1998) – *Water table control on rill initiation and implications for erosional response*. *Geomorphology* 23: 151-169

Buccolini, M.; Coco, L.; Cappadonia, C.; Rotigliano, E. (2012) - *Relationships between a new slope morphometric index and calanchi erosion in northern Sicily, Italy*. *Geomorphology* 149-150: 41-48

Buccolini, M.; Coco, L. (2010) – *The role of the hillside in determining the morphometric characteristics of “calanchi”: The example of Adriatic central Italy*. *Geomorphology* 123: 200-210

Bull, L.J.; Kirkby, M.J. (1997) – *Gully processes and modelling*. *Progress in Physical Geography* 21, 3: 354-374

Bunte, K.; Poesen, J. (1993) – *Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow*. *Water Resources Research* 29: 1415-1424.

Burkard, M.B.; Kostachuck, R.A. (1995) – *Initiation and evolution of gullies along the shoreline of Lake Huron*. *Geomorphology* 14: 211-219

Burkard, M.B.; Kostachuck, R.A. (1997) – *Patterns and controls of gully growth along the shoreline of lake Huron*. *Earth Surface Processes and Landforms* vol. 22: 901-911

Burt, J.E.; Barber, G.M. (1996) - *Elementary Statistics for Geographers*. 2nd Edition. Guilford Press. 640 pp.

Capra, A.; Mazzara, L.M.; Scicolone, B. (2005) – *Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy*. *Catena* 59: 133-146

Carvalho, A.M.G. (2005) - *Geologia Sedimentar Volume II - Sedimentologia*. Ancora Editora. 475 pp.

Carvalho, A.M.G; Carvalhosa, A.B. (1982) - Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000 - Notícia explicativa da folha 32-A (Ponte de Sor). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa

Carvalho Cardoso, J.V.J. (1974) – *A classificação de solos de Portugal*. Boletim de Solos do SROA nº17: 14-46. Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário, Lisboa

Carvalho Junior, O.; Guimarães, R.; Freitas, L.; Gomes-Loebmann, D.; Gomes, R.A.; Martins, E.; Montgomery, D.R. (2010) – *Urbanization impacts upon catchment hydrology and gully development using multi-temporal digital elevation data analysis*. Earth Surface Processes and Landforms 35: 611-617

Casali, J.; López, J.J.; Giráldez, J.V. (1999a) – *Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain)*. Catena 36: 65-84

Casali, J.; Laburu, A.; López, J.J.; García, R. (1999b) – *Digital terrain modelling of drainage channel evolution*. Journal of Agricultural Engineering Research 74: 421-426

Cerdá, A.; Garcia-Fayos, P. (1994) – *Relaciones entre las perdidas de agua, suelo y semillas en zonas acarcavadas. Influencia de la pendiente*. Cuadernos de Investigación Geográfica nº 20-21. pp. 47-63

Cerdan, O. ; Le Bissonnais, Y. ; Couturier, A. ; Bourennane, H. ; Souchère, V. (2002) – *Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France*. Soil & Tillage Research 67 : 99-108

Chang, Kang-Tsung; Chiang, Shou-Hao; Hsu, Mei-Ling (2007) - *Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression*. Geomorphology 89: 335-347

Chaplot, V.; Coadou le Brozec, E.; Silvera, N. ; Valentin, C. (2005) – *Spatial and temporal assessment of linear erosion in catchments under sloping lands of Northern Laos*. Catena 63: 167-184

Chenu, C.; Le Bissonnais, Y.; Arrouays, D. (2000) – *Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability*. Soil Science of America Journal 64: 1479-1486

Childs, E.C.; Collis-George, N.; Holmes, J.W. (1957) – *Permeability measurements in the field as an assessment of anisotropy and structure development*. Journal of Soil Science 8: 27-38

Collison, A.J.C. (2001) – *The cycle of instability: stress release and fissure flow as controls on gully head retreat*. Hydrological Processes 15: 3-12

Costa, J. B. da (2004) – *Caracterização e Constituição do Solo*. Fundação Calouste Gulbenkian. 527 pp.

Costa, F.M.; Bacellar, L.A.P. (2007) – *Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil*. Catena 69: 230-238

Crouch, R.J.; Blong, R.J. (1989) – *Gully sidewall classification: methods and applications*. Z.Geomorph. 33, 3: 291-305

Daba, S.; Rieger, W.; Strauss, P. (2003) – *Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques*. Catena 50: 273-291

Davie, T. (2008) – *Fundamentals of Hydrology*. Routledge. 221 pp.

De Baets, S.; Poesen, J.; Gyssels, G.; Knapen, A. (2006) – *Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow*. Geomorphology 76: 54-67

De Baets, S.; Poesen, J.; Reubens, B.; Wemans, K.; De Baerdemaeker, J.; Muys, B. (2008) – *Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength*. Plant Soil 305: 207-226

De Ploey, J. (1974) – *Mechanical properties of hillslopes and their relation to gullying in Central semi-arid Tunisia*. Z. Geomorph. Suppl. Bd. 21: 177-190

De Ploey, J.; Poesen, J. (1985) – Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In Richards, K.; Arnett, R.; Ellis, S. (Eds.) – *Geomorphology and Soils*. George Allen and Unwin

De Rose, R.C.; Gomez, B.; Marden, M.; Trustrum, N.A. (1998) . *Gully erosion in Mangatu Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models*. Earth Surface Processes and Landforms 23: 1045-1053.

De Santisteban, L.M.; Casalí, J.; López, J.J.; Giráldez, J.V.; Poesen, J.; Nachtergaele, J. (2005) - *Exploring the role of topography in small channel erosion*. Earth Surface Processes and Landforms 30: 591-599

- Desir, G.; Marín, C.; Gutiérrez, M. (2009) – Influencia de los procesos de sofusión (Piping) en la evolución del modelado. Bardenas Reales (Navarra). In Diaz, A.R.; Serrato, F.B.; Sarria, F.A.; Lopez Bermúdez, F. (Coords.) – *Advances in Studies on Desertification: Contributions to the International Conference on Desertification in Memory of Professor John B. Thornes*. Publicaciones de la Universidad de Murcia. Pp. 223-226
- Desmet, P.J.J.; Govers, G. (1997) – *Two-dimensional modelling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography*. *Catena* 29: 283-306
- Desmet, P.J.J.; Poesen, J.; Govers, G.; Vandaele, K. (1999) – *Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies*. *Catena* 37: 377-392
- Donker, N.H.W.; Damen, M.C.J. (1984) – *Gully system development and an assessment of gully initiation risk in Miocene deposits near Daroca – Spain*. *Z. Geomorph. Suppl. Bb.* 49: 37-50
- Dotterweich, M.; Schmitt, A.; Schmidtschen, G.; Bork, H. (2003) – *Quantifying historical gully erosion in northern Bavaria*. *Catena* 50: 135-140
- Drew, D.P. (1982) - Piping in the Big Muddy badlands, southern Saskatchewan, Canada. In Bryan, R.; Yair, A. (Eds.) - *Badland Geomorphology and Piping*. GeoBooks, Norwich. Pp. 293-304
- Dunne, T.; Moore, T.R.; Taylor, C.H. (1975) – *Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions*. *Hydrological Sciences Bulletin* XX, 3: 305-327
- Eastman, J.R. (2006) - *IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing*. Clark University. 327 pp.
- Ebisemiju, F.; Ekiti, A. (1989) – *A morphometric approach to gully analysis*. *Z. Geomorph.* 33, 3: 307-322
- Ekwue, E.J.; Ohu, J.O.; Wakawa, I.H. (1993) – *Effects of incorporating two organic materials at varying levels on splash detachment of some soils from Borno state, Nigeria*. *Earth Surface Processes and Landforms* 18: 399-406
- El Maaoui, M.A.; Felfoul, M.S.; Boussema, M.R.; Snane, M.H. (2012) - *Sediment yield from irregularly shaped gullies located on the Fortuna lithologic formation in semi-arid area of Tunisia*. *Catena* 93: 97-104

Elliot, W.J.; Laflen, J.M. (1993) – *A process-based rill erosion model*. Transactions of the ASAE 36, 1: 35-72

ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2012) - ArcGIS 9.1 Desktop Help. Disponível em: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.1/index.cfm?TopicName=welcome>

Evans, R. (1980) – Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint. In Kirkby, M.J.; Morgan, R.P.C. (Eds.) – *Soil Erosion*. Wiley. pp. 109-128.

Evrard, O.; Biielders, C.L.; Vandaele, K.; van Wesemael, B. (2007) – *Spatial and temporal variations of muddy floods in Central Belgium, off-site impacts and potential control measures*. Catena 70: 443-454

FAO (Food and Agriculture Organization) (1965) – *Soil Erosion by Water. Some Measures for its Control on Cultivated Lands*. FAO Agricultural Paper nº81. Rome

Faulkner, H. (2006) – Piping hazard on collapsible and dispersive soils in Europe. In Boardman, J.; Poesen, J. (Eds.) – *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons. Pp. 537-562

Ferreira, A.B. (2005) - Formas do relevo e dinâmica geomorfológica. In Ferreira, A.B. (Coord.) - *Geografia de Portugal Vol. 1 - O Ambiente Físico*. Círculo de Leitores. Pp. 53-255.

Ferreira, A.B.; Ferreira, D.B.; Machado, C.R.; Machado, M.J.; Pereira, A.R.; Ramos, C.; Rodrigues, M.L.; Zêzere, J.L. (1993) – *A Erosão do Solo e a Intervenção do Homem no Portugal Mediterrâneo*. Linha de Acção de Geografia Física, Relatório nº 31. Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa.

Foster, G.R.; Flanagan, D.C.; Nearing, M.A.; Lane, L.J.; Risse, L.M.; Finkler, S.C. (1995) – Chapter 11. Hillslope Erosion Component. In NSERL - *Water Erosion Prediction Project (WEPP). Technical Documentation*. NSERL Report No.10. National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, IN. (Extraído a 29-6-2009 de: <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=18073>)

Flügel, W.; Märker, M.; Moretti, S.; Rodolfi, G.; Sidorchuk, A. (2003) – *Integrating geographical information systems, remote sensing, ground truthing and modelling approaches for regional classification of semi-arid catchments in South Africa*. Hydrological Processes 17: 929-942

Gábris, G.; Kertész, Á; Zámbo, L. (2003) – *Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment*. *Catena* 50: 151-164

Gallart, F.; Solé, A.; Puigdefàbregas, J.; Lázaro, R. (2002) – Badland systems in the Mediterranean. In Bull, L.J.; Kirkby, M.J. (Eds.) – *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*. John Wiley and Sons.

Ghidey, F.; Alberts, E.E. (1997) – *Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability*. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 40: 129-135

Gilley, J.E.; Flanagan, D.C.; Kottwitz, E.R.; Weltz, M.A. (1992) – Darcy-Weisbach roughness coefficients for overland flow. In, Parsons, A.J.; Abrahams, A.D. – *Overland Flow – Hydraulics and Erosion Mechanics*. Routledge

Giménez, R.; Govers, G. (2002) – *Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds*. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1475-1483

Gómez, J.A.; Nearing, M.A. (2005) - *Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment*. *Catena* 59: 253-266

Gonçalves, F; Zbyszewski, G.; Carvalhosa, A. (1979) – *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000. Notícia explicativa da folha 27-D, Abrantes*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa

Goudie, A.S. (2004) - Arroyo. In Goudie, A.S. (Ed.) - *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge. 1156 pp.

Govers, G. (1990) – *Empirical relationships for the transport capacity of overland flow*. Proceedings of the Jerusalem Workshop, March-April 1987. IAHS Publication no.189.

Govers, G. (1992) – *Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials*. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.17: 515-528

Govers, G.; Raws, G. (1986) – *Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds*. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.11: 515-524

- Govers, G.; Everaert, W.; Poesen, J.; Rauws, G.; De Ploey, J.; Lantier, J.P. (1990) – *A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion*. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.15: 313-328
- Govers, G.; Giménez, R.; Van Oost, K. (2007) – *Rill erosion: exploring the relationship between experiments, modelling and field observations*. *Earth-Science Reviews* 84: 87-102
- Graf, W. (1977) – *The rate law in fluvial geomorphology*. *American Journal of Science* 277: 187-191.
- Graf, W. (1979) – *The development of montane arroyos and gullies*. *Earth Surface Processes*, vol.4: 1-14
- Gregory, K.J.; Walling, D.E. (1973) – *Drainage Basin Form and Process*. Edward Arnold, London
- Grissinger, E. (1996) – Rill and gullies erosion. In Agassi, M. (Ed.) –*Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. CRC Press
- Grove, A.T.; Rackam, O. (2001) – *The Nature of Mediterranean Europe: An Ecological History*. Yale University Press. 384 pp.
- Gruber, S.; Peckham, S. (2009) – Land surface parameters and objects in Hydrology. In Hengl, T.; Reuter, H. (Eds.) – *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science* Vol.33. Elsevier. Pp. 171-194
- Gutiérrez, M.; Sancho, C.; Benito, G.; Sirvent, J.; Desir, G. (1997) – *Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain*. *Geomorphology* 20: 237-253
- Gutiérrez, A.G.; Schnabel, S.; Contador, F.L. (2010) – *Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain*. *Land Degradation & Development* 20: 535-550
- Gyssels, G.; Poesen, J. (2003) – *The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates*. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 371-384
- Gyssels, G.; Poesen, J.; Bochet, E.; Li, Y. (2005) – *Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water : a review*. *Progress in Physical Geography* 29, 2: 189-217

- Hairsine, P.B.; Rose, C.W. (1992a) – *Modeling water erosion due to overland flow using physical principles I – Sheet flow*. Water Resources Research 28: 237-243
- Hairsine, P.B.; Rose, C.W. (1992b) – *Modeling water erosion due to overland flow using physical principles I - Rill flow*. Water Resources Research 28: 245-250
- Hancock, G.R.; Evans, K.G. (2006) – *Gully position, characteristics and geomorphic thresholds in an undisturbed catchment in northern Australia*. Hydrological Processes 20: 2935-2951
- Harvey, A. (1982) – The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain. In Bryan, R.; Yair, A. (Eds.) – *Badland Geomorphology and Piping*. GeoBooks. Pp.317-335
- Harvey, A. (2004) – Badland. In, Goudie, A.S. (Ed.) *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge. Pp.45-48
- Harvey, A.; Gutiérrez-Elorza, M. (2005) – Repeated patterns of Quaternary discontinuous gullying at El Tormillo, Ebro Basin, Spain. In Garcia, C.; Batalla, R.J. (Eds.) – *Catchment Dynamics and Rivers Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*. Elsevier.
- Hauge, C. (1977) – *Soil erosion definitions*. California Geology 30: 202-203
- Heede, B. (1970) – *Morphology of gullies in the Colorado Rocky Mountains*. Bull. of the Internat. Assoc. of Scientific Hydrology, XV, 2: 79-89
- Hengl, T.; Evans, I.S. (2009) - Mathematical and digital models of the land surface. In Hengl, T.; Reuter, H. I. (Eds) - *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier. Pp. 31-63
- Heywood, I.; Cornelius, S.; Carver, S. (2006) - *An Introduction to Geographic Information Systems*. 3rd Edition. Pearson Education. 426 pp.
- Hicks, D.M.; Gomez, B.; Trustrum, N.A. (2000) – *Erosion thresholds and suspended sediment yields, Waipaoa River Basin, New Zealand*. Water Resources Research 36, 4: 1129-1142
- Hill, T.; Lewicki, P. (2006) - *Statistics: Methods and Applications*. 1st Edition. Statsoft. 832 pp.
- Hosmer, D.W.; Lemeshow, S. (2000) - *Applied Logistic Regression*. 2nd Edition. John Wiley and Sons

Horton, R.E. (1945) - *Erosional development of streams and their drainage basins ; hydrophysical approach to quantitative morphology*. Geological Society of America Bulletin 56: 275-370

Hu, G.; Wu, Y.; Liu, B.; Yu, Z.; You, Z.; Zhang, Y. (2007) – *Short-term gully retreat rates over rolling hill areas in black soil of Northeast China*. Catena 71: 321-329

Hutchinson, M.F. (1988) - *Calculation of hydrologically sound digital elevation models*. Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling. Columbus, International Geographical Union: 117-133

Hutchinson, M.F. (1989) - *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*. Journal of Hydrology 106: 211-232.

Hyde, K.; Woods, S.W.; Donahue, J. (2007) – *Predicting gully rejuvenation after wildfire using remotely sensed burn severity data*. Geomorphology 86: 496-511

Imeson, A.C.; Kwaad, F.J. (1980) – *Gully types and gully prediction*. KNAG Geografisch Tijdschrift XIV 5, 430-441.

Ireland, H.A.; Sharpe, C.F.; Eagle, D.H. (1939) – *Principles of Gully Erosion in the Piedmont of South Carolina*. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin 633.

Jones, J.A.A. (1987) – *The initiation of natural drainage networks*. Progress in Physical Geography Vol.11: 207-245.

Jones, J.A.A.; Richardson, J.M.; Jacob, H.J. (1997) - *Factors controlling the distribution of piping in Britain: a reconnaissance*. Geomorphology 20: 289-306

Jones, J.A.A. (2004) - Pipe and Piping. In Goudie, A.S. (Ed.) - *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge. Pps. 784-788

Kakembo, V.; Xanga, W.W.; Rowntree, K. (2009) – *Topographic thresholds in gully development on the hillslopes of communal areas in Ngqushwa Local Municipality, Eastern Cape, South Africa*. Geomorphology 110: 188-194

Kamalu, C. (1993) – *Soil erosion on road shoulders*. Phd Thesis, Cranfield University.

- Kirkby, M.J.; Bracken, L.J. (2009) – *Gully processes and gully dynamics*. Earth Surface Processes and Landforms 34: 1841-1851
- Kirkby, M.J. (2004) - Aspect and Geomorphology. In Goudie, A.S. (Ed.) - *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge: 34-36
- Knapen, A.; Poesen, J.; Govers, G.; Gyssels, G.; Nachtergaele, J. (2007) – *Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review*. Earth-Science Reviews 80: 75-109
- Kroetsch, D.; Wang, C. (2008) - Particle size distribution. In, Carter, M.R.; Gregorich, E.G. (Eds.) - *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd Edition. CRC Press. Pp. 713-726.
- Lado, M.; Ben-Hur, M.; Shainberg, I. (2004) – *Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion*. Soil Science Society of America Journal 68, 1992-1999
- Lado, M.; Ben-Hur, M.; Assouline, S. (2005) – *Effects of effluent irrigation on seal formation, infiltration, and soil loss during rainfall*. Soil Science of America Journal 69: 1432-1439
- Lang, A.; Mauz, B. (2006) – *Towards chronologies of gully formation: optical dating of gully fill sediments from Central Europe*. Quaternary Science Reviews 25: 2666-2675
- Le Bissonnais, Y. (1996) – Soil characteristics and aggregate stability. In Agassi, M. (Ed.) – *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. CRC Press. Pp. 41-60
- Le Bissonnais, Y.; Cerdan, O.; Léonard, J.; Daroussin, J. (2006) - Pan-European Soil Erodibility Assessment. In Boardman, J.; Poesen, J. (Coords) - *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons. Pp. 685-693.
- Lencastre, A.; Franco, F.M. (1992) – *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa. 453 pp.
- Léonard, J.; Richard, G. (2004) – *Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength*. Catena 57: 233-249
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G.; Miller, J.P. (1964) – *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Company. 522 pp.

- Lesschen, J.P.; Cameraat, L.H.; Nieman, T. (2008) – *Erosion and terrace failure due to agricultural land abandonment in a semi-arid environment*. *Earth Surface Processes and Landforms* 33: 1574-1584
- Li, G. (2009) – *Preliminary study of the interference of surface objects and rainfall in overland flow resistance*. *Catena* 78: 154-158
- Maroco, J. (2007) - *Análise Estatística Com Utilização do SPSS*. Edições Sílabo. 3ª Edição. 822 Pp.
- Martínez-Casasnovas, J.A. (2003) – *A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion*. *Catena* 50: 293-308
- Martínez-Casasnovas, J.A.; Antón-Fernández, C.; Ramos, M.C. (2003) – *Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high-resolution digital elevation models and geographical information systems analysis*. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 443-456
- Martínez-Casasnovas, J.A.; Ramos, M.C.; Poesen, J. (2004) – *Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis*. *Geomorphology* 58: 305-321
- Martínez-Casasnovas, J.A.; Ramos, M.C.; Garcia-Hernández, D. (2009) – *Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès region (northeast Spain)*. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 1927-1937
- Martín-Penela, A. J. (1994) – *Pipe and gully systems development in the Almanzora Basin (Southeast Spain)*. *Z-Geomorph.* 38, 2: 207-222
- Martins, A. (2004) - As bacias sedimentares do Baixo Tejo e do Sado. In Feio, M.; Daveau, S. (Orgs.) - *O Relevo de Portugal: Grandes Unidades Regionais*. Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Coimbra. Pp. 49-60
- Martins, B. (2009) – *A Depressão de Régua-Chaves-Verin – Contributo para a Análise do Risco de Ravinamento*. Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra.
- Marzolf, I.; Ries, J., (2007) – *Gully erosion monitoring in semi-arid landscapes*. *Z. Geomorph.* 51, 4: 405-425

- Mataix-Solera, J.; Guerrero, C. (2007) – Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. In, Mataix-Solera, J. (Ed.) – *Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica*. Caja Mediterráneo CEMACAM Font Roja-Alcoy
- Mather, A.E.; Stokes, M.; Griffiths, J.S. (2002) – *Quaternary landscape evolution: a framework for understanding contemporary erosion, Southeast Spain*. Land Degradation and Development 13: 89-109
- Menéndez-Duarte, R.; Marquínez, J.; Fernández-Menéndez, S.; Santos, R. (2007) – *Incised channels and gully erosion in Northern Iberian Peninsula: controls and geomorphic setting*. Catena 71: 267-278
- Mermut, A.R.; Luk, S.H.; Römkens, M.J.M.; Poesen, J.W.A. (1997) – *Soil loss by splash and wash during rainfall from two loess soils*. Geoderma 75: 203-214
- Merten, G.H.; Nearing, M.A.; Borges, A.L.O. (2001) – *Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills*. Soil Science of America Journal 65: 861-868
- Merz, W.; Bryan, R. (1993) – *Critical conditions for rill initiation on sandy loam brunisols: laboratory and field experiments in Southern Ontario, Canada*. Geoderma 57: 357-385
- Meyer, A.; Martínez-Casasnovas, J.A. (1999) – *Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: a logistic modelling approach*. Soil & Tillage Research 50: 319-331
- Middleton, H.E. (1930) - *Properties of soils which influence soil erosion*. US Department of Agriculture Technical Bulletin 178. 16 pp.
- Moretti, S.; Rodolfi, G. (2000) – *A typical “calanchi” landscape on the Eastern Apennine margin (Atri, Central Italy): geomorphological features and evolution*. Catena 40: 217-228
- Morgan, R.C.P. (2005) – *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing. 304 pp.
- Morgan, R.P.C.; Rickson, R.J.; McIntire, K.; Brewer, T.R.; Altshul, H.J. (1997) – *Soil erosion survey of the central part of the Swaziland Middleveld*. Soil Technology 11: 263-289

- Morgan, R.P.C.; Quinton, J.N.; Smith, R.E.; Govers, G.; Poesen, J.W.A.; Auerswald, K.; Chisci, G.; Torri, D.; Styczen, M.E. (1998) – *The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 527-544
- Morgan, R.P.C.; Mngomezulu, D. (2003) – *Threshold conditions for initiation of valley-side gullies in the Middle Veld of Swaziland*. *Catena* 50: 401-414
- Moss, A.J.; Walker, P.H.; Hutka, J. (1979) – *Raindrop-stimulated transportation in shallow water flows: an experimental study*. *Sedimentary Geology* 22: 165-184
- Moss, A.J.; Green, P.; Hutka, J. (1982) – *Small channels: their experimental formation, nature, and significance*. *Earth Surface Processes and Landforms* 7: 401-415
- Mulligan, M; Wainwright, J. (2004) - Modelling and model building. In Wainwright, J.; Mulligan, M. (Eds.) - *Environmental Modelling - Finding Simplicity in Complexity*. John Wiley & Sons. Pp. 7-73
- Muñoz-Robles, C.; Reid, N.; Frazier, P.; Tighe, M.; Briggs, S.V.; Wilson, B. (2010) – *Factors related to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia*. *Catena* 83: 148-157
- Nachtergaele, J.; Poesen, J.; Vandekerckhove, L; Oostwoud Wijdenes, D.; Roxo, M. (2001) – *Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two Mediterranean environments*. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 17-30
- Nachtergaele, J.; Poesen, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Vandekerckhove, L (2002a) – *Medium-term evolution of a gully developed in a loess-derived soil*. *Geomorphology* 46: 223-239
- Nachtergaele, J.; Poesen, J; Sidorchuk, A.; Torri, D. (2002b) – *Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels*. *Hydrological Processes* 16: 1935-1953
- Nearing, M.A.; West, L.T. (1988) – *Soil strength indices as indicators of consolidation*. *Transactions of ASAE* vol. 31, 2: 471-476
- Nearing, M.A.; West, L.T.; Bradford, J.M. (1988) – *Consolidation of an unsaturated illitic clay soil*. *Soil Science Society of America Journal* 52: 929-934

- Nearing, M.A.; Foster, G.R.; Lane, L.J.; Finkner, S.C. (1989) – *A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology*. Transactions of the ASAE, vol. 32, 5: 1587-1593.
- Nearing, M.A.; Lane, L.J.; ALberts, E.E.; Laflen. J.M. (1990) – *Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs*. Soil Science of America Journal 54: 1702-1711.
- Nearing, M.A. (1991) – *A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow*. Transactions of the ASAE, vol.34, 1: 81-85
- Nearing, M.A.; Norton, L.D.; Bulgakov, D.A.; Larionov, G.A.; West, L.T.; Dontsova, K.M. (1997) – *Hydraulics and erosion in eroding rills*. Water Resources Research, vol.33, 4: 865-876
- Neteler, M.; Mitasova, H. (2008) - *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Springer
- Nir, D.; Klein, M. (1974) – *Gully erosion induced in land use in a semi-arid terrain (Nahal Shikma, Israel)*. Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd 21: 191-201
- Nogueras, P.; Burjachs, F.; Gallart, F.; Puigdefàbregas, J. (2000) – *Recent gully erosion in the El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain)*. Catena 40: 203-215
- Norton, L.D.; Mamedov, A.I.; Huang, C.; Levy, G. (2006) –Soil aggregate stability as affected by long-term tillage and clay mineralogy. *In*, Horn, R.; Fleige, H.; Peth, S.; Peng, X. (Eds.) *Soil Management for Sustainability*. Advances in GeoEcology 38. Catena Verlag. Pp. 422-429.
- Nyssen, J.; Poesen, J.; Moeyersons, J.; Luyten, E.; Veyret-Picot, M.; Deckers, J.; Haile, M.; Govers, G. (2002) – *Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands*. Earth Surface Processes and Landforms 27: 1267-1283
- Nyssen, J.; Poesen, J.; Veyret-Picot, M.; Moeyersons, J; Haile, M; Deckers, J.; Dewit, J.; Naudts, J.; Teka. K.; Govers, G. (2006) – *Assessment of gully erosion rates through interviews and measurements: a case study from northern Ethiopia*. Earth Surface Processes and Landforms 31: 167-185
- Okagbue, C.O.; Uma, K.O. (1987) – *Performances of gully erosion control measures in southeastern Nigeria*. Forest Hydrology and Watershed Management. Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987. IAHS Publication no.167
- Olaya, V. (2009) - Basic Land-Surface Parameters. In Hengl, T.; Reuter, H. (Eds.) - *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier. Pp. 141-169

Oliveira, J.T.; Pereira, E.; Ramalho, M.M.; Antunes, M.T. (1992) - Carta Geológica de Portugal na escala de 1:500000. 5ª edição. Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia.

Oostwoud Wijdenes, D.; Poesen, J.; Vandekerckhove, L.; Nachtergaele, J.; De Baerdemaeker, J. (1999) – *Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata, Southeast Spain*. *Earth Surface Processes and Landforms* 24: 585-603

Oostwoud Wijdenes, D.; Poesen, J.; Vandekerckhove, L.; Guesquierem, M. (2000) – *Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment*. *Catena* 39: 147-167

Oostwoud Wijdenes, D.J.; Bryan, R. (2001) – *Gully-head erosion processes on a semi-arid valley floor in Kenya: a case study into temporal variation and sediment budgeting*. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 911-933

Panin, A.V.; Fuzeina, J.N.; Belyaev, V.R.(2009) – *Long-term development of Holocene and Pleistocene gullies in the Provta River Basin, Central Russia*. *Geomorphology* 108: 71-91

Parkner, T.; Page, M.; Marutani, T.; Trustrum, N. (2006) – *Development and controlling factors of gullies and gully complexes. East Coast, New Zealand*. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 187-199.

Parkner, T.; Page, M.; Marden, M.; Marutani, T. (2007) – *Gully systems under undisturbed indigenous forest, East Coast Region, New Zealand*. *Geomorphology* 84: 241-253

Patton, P.C.; Schumm, S.A. (1975): *Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon*. *Geology* 3: 83-90

Pedrosa, A.; Bateira, C.; Soares, L.; Silvério, M. (2001) – Metodologia para o estudo dos ravinamentos. In *Metodologias de Estudos de Processos de Erosão do Solo*. Universidade do Porto. Pp. 85-98

Perroy R.L.; Bookhagen, B.; Asner, G.P.; Chadwick, O.A. (2010) – *Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground based LiDAR on Santa Cruz Island, California*. *Geomorphology* 118: 288-300

Piégay, H.; Schumm, S. A. (2003) - System approaches in fluvial geomorphology. In Kondolf, M.; Piégay, H. (Eds.) - *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley and Sons. Pp.105-134

Poesen, J. (1992) – Mechanisms of overland flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragments. In, Parsons, A.J.; Abrahams, A.D. – *Overland Flow – Hydraulics and Erosion Mechanics*. Routledge. Pp.262-291

Poesen, J. (1993) – Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In, Wicherek, S. (Ed.) – *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Elsevier, Amsterdam, pp. 221-239

Poesen, J.; Govers, G. (1990) – Gully erosion in the loam belt of Belgium: typology and control measures. In Boardman, J.; Foster, I.D.L.; Dearing, J.A. (Eds.) – *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley and Sons. Pp. 513-530

Poesen, J.; Lavee, H. (1991) – *Effects of size and incorporation of synthetic mulch on runoff and sediment yield from interrills in a laboratory study with simulated rainfall*. Soil & Tillage Research 21: 209-23.

Poesen, J.; Vandaele, K.; Van Wesemael, B. (1996) - Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. Proceedings of the Exeter Symposium, July. IAHS Publication n° 236

Poesen, J.; Hooke, J.M. (1997) – *Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe*. Progress in Physical Geography 21, 2: 157-199

Poesen, J.; De Luna, E.; Franca, A.; Nachtergaele, J.; Govers, G. (1999) – *Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content*. Catena 36: 315-329

Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C. (2003) – *Gully erosion and environmental change: importance and research needs*. Catena 50: 91-133

Poesen, J.; Vanwalleghem, T.; de Vente, J.; Knapen, A.; Verstraeten, G.; Martínez-Casasnovas, J. (2006) – Gully erosion in Europe. In Boardman, J.; Poesen, J. (Eds.) – *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons. Pp. 515-536

- Prosser, I.P.; Hughes, A.O.; Rutherford, I.D. (2000) – *Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia*. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1085-1101.
- Radoane, M.; Ichim, I.; Radoane, N. (1995) – *Gully distribution and development in Moldavia, Romania*. *Catena* 24: 127-146
- Rauws, G; Govers, G. (1988) – *Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils*. *The Journal of Soil Science*, 39: 111-124
- Rebelo, F. (1981) – *Introdução ao estudo dos processos erosivos actuais na região litoral do Norte e Centro de Portugal*. *Revista da Universidade de Coimbra* 29: 195-248
- Rebelo, F. (1982) – *Considerações metodológicas sobre o estudo dos ravinamentos*. *Comunicações, II Colóquio Ibérico de Geografia, Lisboa, 1980. Vol.1. p.339-350*
- Rebelo, F.; Cunha, L.; Rochette Cordeiro, AM. (1986) – *Sobre a origem e a evolução actual dos ravinamentos em calcários margosos na área de Condeixa*. *Actas do IV Colóquio Ibérico de Geografia, Coimbra. Pp. 875-882*.
- Rebelo, F. (2002) – *Factores naturais e factores antrópicos nas dinâmicas de vertente em meios mediterrâneo-atlânticos*. *In, Contribuições para a Dinâmica Geomorfológica*. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos Vol.1. APGEOM. Pp.20-25
- Reid, L.; Dewey, N.J.; Lisle, T.E.; Hilton, S. (2010) – *The incidence and role of gullies after logging in a coastal redwood forest*. *Geomorphology* 117: 155-169
- Reuter, H.I.; Nelson, A. (2009) - *Geomorphometry in ESRI packages*. In Hengl, T.; Reuter, H. I. (Eds) - *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier. Pp. 270-291
- Rockwell, D.L. (2002) – *The influence of groundwater on surface flow erosion processes during a storm*. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 495-514
- Romero-Díaz, A.; Belmonte Serrato, F.; Ruiz Sinoga, J.D. (2010) – *The geomorphic impact of afforestations on soil erosion in Southeast Spain*. *Land Degradation & Development* 21: 188-195
- Roxo, M.J.; Casimiro, P.C.; (1999) - *MEDALUS: Mediterranean Desertification and Land Use*.

Estudos sobre Desertificação no Baixo Alentejo Interior – Concelho de Mértola. GeoInova – Revista do Departamento de Geografia e Planeamento Regional, Nº 0, Faculdade de Ciências Sórias e Humanas da Universidade Nova de Lisboa: 6-29

Roxo, M.J.; Calvo-Cases, A. (2009) – Analysing the factors affecting gully development and their relationships with land-use changes in the east Alentejo (Portugal). In Diaz, A.R.; Serrato, F.B.; Sarria, F.A.; Lopez Bermúdez, F. (Coords.) – *Advances in Studies on Desertification: Contributions to the International Conference on Desertification in Memory of Professor John B. Thornes*. Publicaciones de la Universidad de Murcia.

Reuter, H.I.; Nelson, A. (2009) - Geomorphometry in ESRI packages. In Hengl, T.; Reuter, H. I. (Eds) - *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier. Pp. 270-291

Rutherford, I.D.; Prosser, I.P.; Davis, J. (1997) – Simple approaches to predicting rates and extent of gully development. In, Wang, S.S.Y.; Langendoen, E.J.; Shields, J.R. (Eds.) – *Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*. The University of Mississippi, Oxford, Mississippi, U.S.A.: 1125-1130.

Savat, J. (1977) – *The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall*. Earth Surface Processes, vol. 2: 125-140

Savat, J. (1979) – *Laboratory experiments on erosion and deposition of loess by laminar sheetflow and turbulent rill flow*. Proceedings of Seminar on agricultural soil erosion in temperate non-Mediterranean climate. Strasbourg-Colmar, 139-143

Savat, J. (1982) – *Common and uncommon selectivity in the process of fluid transportation: field observations and laboratory experiments on bare surfaces*. Catena Supplement 1: 139-160

Savat, J.; DePloey, J. (1982) – *Sheetwash and rill development by surface flow*. In Bryan, R.B.; Yair, A. (Eds.) – *Badland Geomorphology and Piping*. Geobooks, Norwich. 113-126

Schumm, S.A. (1979) – *Geomorphic Thresholds: the concept and its applications*. Transactions of the Institute of British Geographers, New Series, Vol.4, pp. 484-515

Schumm, S.A.; Harvey, M.D.; Watson, C.C. (1984) – *Incised Channels*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

Seeger, M.; Marzolf, I.; Ries, J.B. (2009) – *Identification of gully-development processes in semi-arid NE Spain*. *Z. Geomorph. N.F.* 53, 4: 417-431

Shainberg, I.; Levy, G.J. (1996a) – Infiltration and seal formation processes. In, Agassi, M. (Ed.) – *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. CRC Press, pp.1-22

Shainberg, I.; Goldstein, D.; Levy, G.J. (1996b) – *Rill erosion dependence on soil water content, aging and temperature*. *Soil Science Society of America Journal* 60, 3: 916-922

Sheridan, G.J.; So, H.B.; Loch, R.J.; Pocknee, C.; Walker, C.M. (2000a) – *Use of laboratory-scale rill and interrill erodibility measurements for the prediction of hillslope-scale erosion on rehabilitated coal mine soils and overburdens*. *Australian Journal of Soil Research* 38: 285-297

Sheridan, G.J.; So, H.B.; Loch, R.J.; Walker, C.M. (2000b) – *Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties*. *Australian Journal of Soil Research* 38: 256-284

Sidorchuk, A. (1999) – *Dynamic and static models of gully erosion*. *Catena* 37: 401-414

Slattery, M. (2004) - Runoff Generation. In Goudie, A.S. (Ed.) - *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge. Pp. 885-886

Slattery, M.; Bryan, R. (1992) – *Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment*. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 127-146

Slaymaker, O. (1982) – The occurrence of piping and gullying in the Penticton glacio-lacustrine silts, Okanagan Valley, B.C. In Bryan, R.; Yair, A. (Eds.) - *Badland Geomorphology and Piping*. Geo books, Norwich. Pp. 305-316

Soil Science Society of America (2001) – *Glossary of Soil Science Terms*. Soil Science Society of America, Madison, WI. <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>. Acedido em 5-6-2009.

Souchère, V.; Cerdan, O.; Ludwig, B.; Le Bissonais, Y.; Couturier, A.; Papy, F. (2003) – *Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments*. *Catena* 50: 489-505

Stankoviansky, M. (2003) – *Historical evolution of permanent gullies in the Myjava Hill Land, Slovakia*. *Catena* 51: 223-239

- Summerfield, M (1991) - *Global Geomorphology*. Pearson Education. 537 pp.
- Thomas, J.T.; Iverson, N.R.; Burkart, M.R.; Kramer, L.A. (2004) – *Long-term growth of a valley-bottom gully, western Iowa*. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 995-1009
- Thomas, J.T.; Iverson, N.R.; Burkart, M.R. (2009) – *Bank-collapse processes in a valley bottom gully, western Iowa*. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 109-122
- Thornes, J.B. (1980) – Erosional processes of running water and their spatial and temporal controls: a theoretical viewpoint. In Kirkby, M.J.; Morgan, R.P.C. (eds.) – *Soil Erosion*. John Wiley and Sons.
- Torri, D.; Sfalanga, M.; Chisci, G.M. (1987) – Threshold conditions for incipient rilling. In, Bryan, R.B. (Ed.) – *Rill Erosion*. *Catena Supplement* 8: 97-105
- Toy, T.; Foster, G.; Renard, K. (2002) – *Soil Erosion. Processes, Measurement and Control*. Wiley. 338 pp.
- Valcárcel, M.; Taboada, M.T.; Paz, A.; Dafonte, J. (2003) – *Ephemeral gully erosion in northwestern Spain*. *Catena* 50: 199-216
- Valentin, C.; Poesen, J.; Li, Y. (2005) – *Gully erosion: impacts, factors and control*. *Catena* 63: 132-153
- Van Den Brink, J.W.; Jungerius, P.D. (1983) – *The deposition of stony colluvium on clay soil as a cause of gully formation in the Rif mountains, Morocco*. *Earth Surface Processes and Landforms* Vol. 8: 281-285
- Van Wesemael, B.; Poesen, J.; Kosmas, C.; Danalatos, N.G.; Nachtergaele, J. (2002) - The impact of rock fragments on soil degradation and water conservation. In, Geeson, N.; Brandt, C.; Thornes, J. (Eds.) – *Mediterranean Desertification – A Mosaic of Processes and Responses*. John Wiley and Sons. Pp. 131-145
- Vandaele, K.; Poesen, J.; Govers, G.; van Wesemael, B. (1996) – *Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision*. *Geomorphology* 16: 161-173
- Vandaele, K.; Poesen, J.; Marques de Silva, J.R.; Govers, G.; Desmet, P. (1997) – *Assessment of factors controlling ephemeral gully erosion in Southern Portugal and Central Belgium using aerial photographs*. *Z. Geomorph. N. F.* 41, 3: 273-287

Vandekerkhove, L.; Poesen, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Figueiredo, T. de (1998) – *Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean*. *Catena* 33: 271-292

Vandekerkhove, L.; Poesen, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Nachtergaele, J.; Kosmas, C.; Roxo, M.J.; Figueiredo, T. de (2000a) - *Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe*. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 1201-1220

Vandekerkhove, L.; Poesen, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Gyssels, G.; Beuselink, L.; de Luna, E. (2000b) – *Characteristics and controlling factors of bank gullies in two semi-arid Mediterranean environments*. *Geomorphology* 33: 37-58

Vandekerkhove, L.; Poesen, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Gyssels, G. (2001) – *Short term bank gully retreat rates in Mediterranean environments*. *Catena* 44: 133-161

Vandekerkhove, L.; Poesen, J. Govers, G. (2003) – *Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements*. *Catena* 50: 329-352

van Wesemael, B.; Poesen, J.; Kosmas, C.; Danalatos, N.G.; Nachtergaele, J. (2002) - The impact of rock fragments on soil degradation and water conservation. In, Geeson, N.; Brandt, C.; Thornes, J. (Eds.) – *Mediterranean Desertification – A Mosaic of Processes and Responses*. John Wiley and Sons. Pp. 131-145

Vanwalleghem, T.; Van Den Eeckhaut, M.; Poesen, J.; Deckers, J.; Nachtergaele, J.; Van Oost, K.; Slenters, C. (2003) – *Characteristics and controlling factors of old gullies under forest in a temperate humid climate: a case study from the Meerdal Forest (Central Belgium)*. *Geomorphology* 56: 15-29

Vanwalleghem, T.; Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G. (2005a) – *Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils*. *Geomorphology* 69: 76-91

Vanwalleghem, T.; Bork, H.R.; Poesen, J.; Schmidtchen, G.; Dotterweich, M.; Nachtergaele, J.; Bork, H.; Deckers, J.; Brusch, B.; Bungeneers, J.; De Bie, M. (2005b) – *Rapid development and infilling of a buried gully under cropland, central Belgium*. *Catena* 63: 221-243

- Vanwalleghem, T.; Van Den Eeckhaut, M.; Poesen, J.; Govers, G.; Deckers, J. (2008) – *Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest: application of rare event logistic regression*. *Geomorphology* 95: 504-517
- Verachtert, E.; Van Den Eeckhaut, M.; Poesen, J.; Deckers, J. (2010) – *Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium*. *Geomorphology* 118: 339-348
- Verstraeten, G.; Bazzoffi, P.; Lajczak, A.; Radoane, M.; Rey, F.; Poesen, J.; de Vente, J. (2006) – Reservoir and Pond Sedimentation in Europe. In Boardman, J.; Poesen, J. (Eds.) – *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons. Pp. 759-774
- Wainwright, J.; Thornes, J. (2004) – *Environmental Issues in the Mediterranean – Processes and Perspectives From the Past and Present*. Routledge. pp. 479
- Wakindiki, I.I.C.; Ben-Hur, M. (2002) – *Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, and erosion*. *Soil Science Society of America Journal* 66: 897-905
- Wasson, R.J.; Caitcheon, G.; Murray, A.S.; Mcculloch, M.; Quade, J. (2002) – *Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of lake Argyle, Northwestern Australia*. *Environmental Management* 29: 634-646
- Weibel, R; Heller, M. (1991) Digital Terrain Modelling. In Maguire, D.J.; Goodchild, M.F.; Rhind, D.W. (Eds.) - *Geographical Information Systems: Principles and Applications*: 269-297
- Wells, N. (2004) – Gully. In Goudie, A.S. (Ed.) – *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge. pp. 503-506.
- Wells, N.; Andriamihaja, B.; Rakotovololona, H.F. (1991) – *Patterns of development of lavaka, Madagascar's unusual gullies*. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.16: 189-206
- Wells, S.G.; Gutierrez, A.A. (1982) - *Quaternary evolution of badlands in the south-eastern Colorado plateau, USA*. In Bryan, R; Yair, A. (Eds.) - *Badland Geomorphology and Piping*. GeoBooks. Pp. 239-258
- Wischmeyer, W.H.; Smith, D.D. (1978) – *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No.537

Wood, A.L.; Simon, A.; Downs, P.W.; Thorne, C.R. (2001) – *Bank-toe processes in incised channels: the role of apparent cohesion in the entrainment of failed bank materials*. Hydrological Processes 15: 39-61

Woodward, D.E. (1999) – *Method to predict cropland ephemeral gully erosion*. Catena 37: 393-399

Wu, Y.; Cheng, H. (2005) – *Monitoring of gully erosion in the Loess Plateau of China using a global positioning system*. Catena 63: 154-166

Yao, C.; Lei, T.; Elliot, W.J.; McCool, D.K.; Zhao, J.; Chen, S. (2008) – *Critical conditions for rill initiation*. Transactions of the ASABE Vol.51, 1: 107-114

Youngs, E.G. (1964) – *The state and movement of water in Living Organisms*. Cambridge University Press.

Zachar, D. (1982) – Soil Erosion. *Developments in Soil Science 10*. Elsevier. 547 Pp.

Zbyszewski, G.; Carvalhosa, A. B. (1984) - Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Folha 31-D (Montargil). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa

Zbyszewski, G.; Carvalhosa, A.; Gonçalves, F. (1981) - Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Folha 28-C (Gavião). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa

Zbyszewski, G.; Veiga Ferreira, O. da (1979) - Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Folha 31-B (Chouto). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa

Zbyszewski, G.; Veiga Ferreira, O. da (1968) - Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Folha 31-C (Coruche). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa

Zbyszewski, G. (1953) - Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Folha 31-A (Santarém). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa

Zimbone, S.M.; Vickers, A.; Morgan, R.P.C.; Vella, P. (1996) – *Field investigations of different techniques for measuring surface soil shear strength*. Soil Technology 9: 101-111.

Zhu, T.X. (2003) – *Tunnel development over a 12 year period in a semi-arid catchment of the loess plateau, China*. *Earth Surface Processes and Landforms* 28: 507-525

Zucca, C.; Canu, A.; Della Peruta, R. (2006) – *Effects of land use and landscape on spatial distribution and morphological features of gullies in an agropastoral area in Sardinia (Italy)*. *Catena* 68: 87-95