

MARCOS HEIL COSTA

MODELO DE OTIMIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS
PARA IRRIGAÇÃO, CONFORME A ÉPOCA DE PLANTIO

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para Obtenção do Título
de "Magister Scientiae"

T
1991
12

VIÇOSA

MINAS GERAIS - BRASIL

DEZEMBRO - 1991

BIBLIOTECA
DEPTO. ENG. AGRÍCOLA

Ficha catalográfica preparada pela Área de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

C837m
1991

Costa, Marcos Heil.

Modelo de otimização dos recursos hídricos para
irrigação, conforme a época de plantio. Viçosa,
UFV, 1991.

111p. ilustr.

Tese (M.S.) - UFV

1. Recursos hídricos - Otimização para irri-
gação. 2. Culturas agrícolas - Época de plantio.
3. Evapotranspiração. 4. Irrigação. I. Universi-
dade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 18.ed. 630.251572

CDD 19.ed. 630.251572

MARCOS HEIL COSTA

MODELO DE OTIMIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS
PARA IRRIGAÇÃO, CONFORME A ÉPOCA DE PLANTIO

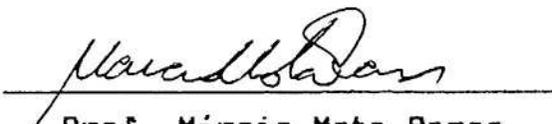
Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para Obtenção do Título
de "Magister Scientiae".

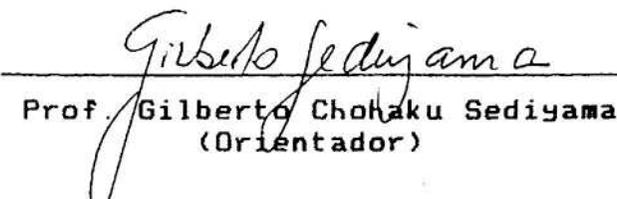
APROVADA: 19 de junho de 1991


Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Conselheiro)


Prof. Adil Rainier Alves
(Conselheiro)


Prof. Evandro de Castro Melo


Prof. Márcio Mota Ramos


Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Orientador)

A meu pai, in memoriam,
pela minha inteligência.
À minha mãe, pela minha
capacidade de trabalho.
A dois grandes homens,
Ariovisto M. de Almeida Rego
e Francisco F. Feitosa Teles,
pelo exemplo a ser seguido.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de aprimoramento acadêmico.

À CAPES que, pela concessão de auxílio financeiro, tornou viável a realização deste curso.

Ao PRONI e à EPAMIG, cuja ajuda financeira facilitou o desenvolvimento e a complementação deste trabalho.

Ao Professor Orientador Gilberto Chohaku Sedyama, pela orientação, amizade e confiança.

Aos Professores Adil Rainier Alves, Manoel Vieira, Luiz Cláudio Costa, Dirceu Teixeira Coelho, Daniel Marçal de Queiroz, Márcio Mota Ramos e Evandro de Castro Melo, pelos conselhos e pelas sugestões dadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Agrícola e do Departamento de Matemática, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários da PROPEC, da CODEVASF e da COVAG, pelo auxílio na coleta de dados.

Aos meus pais, à minha irmã Márcia, à minha esposa Silvia, e à minha prima Paula, pelo apoio, incentivo e pela insistência na minha perseverança.

Aos meus colegas e amigos Brauliro, Cláudia, Jornandes, Zilda, Regina, Gabriel, Sérgio, Edson, Marco Aurélio, Klinger, Jorge Washington, Raimunda e Jacqueline, pela boa convivência e pela amizade.

À Maria do Carmo, Edna e aos demais funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela prestatividade.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Marcos Heil Costa, filho de Waldyr Costa e Maria Aparecida Heil Costa, nasceu no Rio de Janeiro - RJ, em 14 de setembro de 1965. Iniciou o primeiro grau no Colégio Marista São José, no Rio de Janeiro, e concluiu-o no Colégio Dom Bosco, em Brasília, em 1979. Concluiu o segundo grau no COLUNI, em Viçosa, em 1982.

Em 1983, prestou vestibular e ingressou no curso de Engenharia Agrícola, formando em dezembro de 1986.

Em 1987 e 1988, desenvolveu atividade particular na Fazenda Moinhos, em Leandro Ferreira - MG. Em agosto de 1988, iniciou o curso de mestrado em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa. Em fevereiro de 1991, foi contratado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
EXTRATO	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. METODOLOGIA	6
2.1 Enfoque Geral	6
2.2 Modelo de Simulação Adotado	8
2.3 Diagrama de Blocos do Modelo	12
2.4 Região de Estudo	14
2.5 Determinação da Evapotranspiração Potencial	14
2.5.1 Método de Penman	16
2.5.2 Método da Radiação	21
2.5.3 GeraETP - O Programa para Calcular ETP	22
2.5.4 Evapotranspiração Potencial Provável	23
2.5.5 Dados Utilizados na Determinação da ETP	26
2.5.6 Dados de Evapotranspiração Potencial	26
2.6 Culturas Irrigadas	27
2.7 Coeficiente de Cultura	28
2.7.1 Valores Utilizados na Simulação	29
2.8 Precipitação na Área em Estudo	34
2.8.1 Precipitação Provável	34
2.8.2 Dados Utilizados na Determinação da Precipitação Efetiva	37
2.8.3 Dados de Precipitação Efetiva	39
2.8.4 Interpolação	41
2.9 Cursos d'Água da área em Estudo	42

2.9.1	Representação da Bacia Hidrográfica em Estrutura de Dados Tratável por Computador	42
2.9.2	Codificação dos Cursos d'Água	44
2.9.3	Vazão dos Cursos d'Água	46
2.10	Outros Parâmetros do Modelo	48
2.10.1	Coeficiente de "run-off"	48
2.10.2	Eficiência dos Sistemas de Irrigação	50
2.11	Simulação do Consumo de Água pelas Culturas	50
2.11.1	Definição de Célula	50
2.11.2	Determinação do Consumo de Água em cada Célula	52
2.11.3	Determinação das Melhores Combinações de Época de Plantio	54
2.11.4	Programa de Simulação	54
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.1	Resultados	58
3.2	Sensibilidade do Modelo	63
3.2.1	Coeficiente de "run-off"	63
3.2.2	Eficiência dos Sistemas de Irrigação	64
3.2.3	Nível de Probabilidade	64
3.2.4	Profundidade do Sistema Radicular	65
3.3	Validação do Modelo	65
4.	CONCLUSÕES	67
5.	BIBLIOGRAFIA	69
	APÊNDICES	75
	Apêndice A	76
	Apêndice B	78
	Apêndice C	107
	Apêndice D	109
	Apêndice E	111

LISTA DE QUADROS

	Página
1 Produção Total de Grãos no País- 1980-1989 (em Toneladas).....	1
2 Área Plantada no País e sua Taxa de Crescimento	2
3 Variáveis Utilizadas na Determinação da ETP pelo Método de Penman	20
4 Coeficientes para Correção do Produto (W.Rs') em ETP, Conforme a Equação 2.24	23
5 Características das Estações Climáticas da Bacia do Rio Verde Grande	26
6 Dados de ETP, em mm, para Montes Claros	27
7 Coeficientes de Cultura Adotados pela COVAG	30
8 Valores de FT Acumulados por Estádio do Ciclo das Culturas de Algodão, Feijão e Milho	31
9 Coeficientes de Cultura para o Algodão Plantado em 12 Diferentes Épocas de Plantio, para o Norte do Estado de Minas Gerais	32
10 Coeficientes de Cultura para Feijão Plantado em 12 Diferentes Épocas de Plantio, para o Norte do Estado de Minas Gerais	32
11 Coeficientes de Cultura para Milho Plantado em 12 Diferentes Épocas de Plantio, para o Norte do Estado de Minas Gerais	33

12	Comprimento do Ciclo das Culturas, em Dias, Conforme a Época de Plantio	33
13	Características das Estações Pluviométricas da Região em Estudo	38
14	Precipitação que Tem 75 % de Probabilidade de Ser Igualada ou Superada, por Estação, para os 12 Períodos do Ano	41
15	Características das Sub-bacias Hidrográficas na Região em Estudo	49
16	Eficiência dos Diversos Sistemas de Irrigação	50
17	Vazões dos Cursos d'Água da Bacia do Rio Verde Grande, Calculadas pelo Programa de Simulação, para a Melhor Combinação das Épocas de Plantio das Células Contidas Naquele Curso d'Água, por Período do Ano	59
18	Vazão Simulada para Algumas Células da Área em Estudo .	60
19	Épocas de Plantio que Levam a Um Menor Consumo de Água para Fins de Irrigação	61

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Procedimento a Ser Seguido na Solução de um Problema .	7
2 Diagrama de Blocos do Modelo de Simulação	12
3 Mapa da Região em Estudo	15
4 Diagrama de Blocos do Programa GeraETP	24
5 Distribuição dos Dados de Evapotranspiração Potencial e a Posição do Valor que Tem 75 % de Probabilidade de Ocorrer	25
6 Gráfico da Função de Probabilidade Gama Incompleta ...	35
7 Diagrama de Blocos da Metodologia Utilizada pelo Software Gamma para o Cálculo da Precipitação que Tem 25 % de Probabilidade de Ocorrer	38
8 Mapa de Isoietas (75 % de Probabilidade) da Região em Estudo, para o Primeiro Decêndio do Ano	40
9 Cursos d'Água Utilizados na Simulação	43
10 Representação da Bacia Hidrográfica em Estudo sob a Forma de Árvore Binária	45
11 Curso d'Água Genérico	47
12 Fluxograma do Programa de Simulação	55
13 Vazão do Rio Verde Grande em Função da Sua Abscissa, em Seu Trecho de Maior Comprimento	60

LISTA DE SÍMBOLOS

- α - parâmetro de forma da distribuição gama incompleta;
- β - parâmetro de escala da distribuição gama incompleta;
- Δ - declividade da curva de pressão de saturação versus temperatura (de/dt), determinada na temperatura média do ar ($mb.^{\circ}C^{-1}$);
- ϵ_c - eficiência do sistema que irriga a célula c, em decimal;
- γ - constante psicrométrica, ($mb.^{\circ}C^{-1}$);
- Γ - função gama;
- λ - valor de precipitação que tem probabilidade acumulada Prob' de ocorrer;
- μ - média de uma população;
- θ - ângulo relativo ao dia juliano;
- σ - desvio-padrão de uma população;
- Ω - vazão de um curso d'água devida à precipitação instantânea;
- A - parâmetro da distribuição gama;
- A - área da célula em ha;

- Alt - altitude em m;
- alb - albedo de uma superfície coberta completamente com vegetação em crescimento ativo, adimensional;
- a, b - constantes da equação de Angstrom;
- a_0, b_0 - coeficientes para conversão do produto $W.R_s'$ em ETP;
- ARM_{cup} - armazenamento de água no solo da célula c, no espaço ocupado pelas raízes da cultura u, durante o período p, em mm;
- c - contador de células;
- C - coeficiente de "run-off", adimensional;
- CRH_{cui} - capacidade de retenção hídrica do solo da célula c, cultivado com a cultura u, no estágio i de seu desenvolvimento;
- $(\bar{D}/D)^2$ - fator de correção da excentricidade da órbita da Terra ao redor do Sol, adimensional;
- dia - ordem do dia no ano (dia juliano), adimensional;
- dA - diferencial de área;
- DRA_c - disponibilidade real de água no solo da célula c, em mm por cm de solo;
- ETR - evapotranspiração real em $mm.dia^{-1}$;
- ETP - evapotranspiração potencial em $mm.dia^{-1}$;
- ETP(75%) - evapotranspiração potencial que tem 75 % de probabilidade acumulada de ocorrer;
- ETP_p - evapotranspiração potencial, durante o período p, em mm;
- e_s - pressão de saturação de vapor d'água, para a temperatura média diária, em mb;
- e_a - pressão atual de vapor em mb.

- f - fator de ajustamento que depende da umidade média e das condições de vento durante o dia, adimensional;
- FT - função temperatura, adimensional;
- G - fluxo de calor no solo em $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$;
- H - ângulo horário correspondente ao nascer e por do Sol, em radianos;
- i - contador de períodos no interior do ciclo da cultura, um para $p = e$;
- ins - número de horas de brilho solar diário;
- Kc - coeficiente de cultura, adimensional;
- KC_{uie} - coeficiente da cultura u no i-ésimo período de seu ciclo, que se iniciou na época de plantio e (adimensional);
- k_{rp} - coeficiente que relaciona o comprimento do trecho do curso d'água r, com a sua vazão devida ao lençol freático, no período p, em $10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$;
- K_{rp} - idem, com sua vazão devida à precipitação instantânea;
- L - calor latente de vaporização em cal.cm^{-3} ;
- lat - latitude do local em graus;
- N - comprimento do dia, ou número máximo possível de horas de brilho solar;
- n - número de dados que compõem a série de precipitação;
- NH_{up} - necessidade hídrica da cultura u, durante o período p, em mm;
- p - contador de períodos;
- P_p - precipitação, durante o período p, em mm;
- P - valor genérico de precipitação;
- Pres - pressão atmosférica local em mb;

- PSR_{ui} - profundidade do sistema radicular da cultura u , no i -ésimo estágio de seu desenvolvimento, em cm;
- $Prob'$ - probabilidade de que P esteja entre θ e o valor λ ;
- $Prob$ - probabilidade mista de ocorrência da precipitação P ;
- $Q\theta$ - probabilidade de que P seja igual a zero;
- $Q1$ - probabilidade de que P seja maior do que zero;
- Q_{rx} - vazão do curso d'água r , na abscissa x de seu comprimento total L_r em $m^3.s^{-1}$;
- QI_r - vazão inicial do curso d'água r em $m^3.s^{-1}$;
- QF_r - vazão final do curso d'água r em $m^3.s^{-1}$;
- q_{rx} - vazão devida à contribuição do lençol freático, $m^3.s^{-1}$;
- q_{tp} - vazão residual medida na estação fluviométrica, no período p em $m^3.s^{-1}$;
- r - contador de cursos d'água;
- R_n - saldo diário de radiação solar sobre a superfície, em $cal.cm^{-2}$;
- R_b - saldo diário de radiação de ondas longas sobre a superfície, em $cal.cm^{-2}$;
- R_{b_0} - saldo diário de radiação de ondas longas à superfície, nos dias sem nuvens, $cal.cm^{-2}$;
- R_s - irradiância solar global diária sobre a superfície, em $cal.cm^{-2}$;
- R_{s_0} - irradiância solar diária numa superfície horizontal no topo da atmosfera, em $cal.cm^{-2}$;
- R_s' - radiação solar equivalente à evaporação em $mm.dia^{-1}$;
- S_r - área da sub-bacia r em km^2 ;
- S_t - área de drenagem da estação fluviométrica em km^2 ;
- T_m - temperatura média do período em questão em $^{\circ}C$;

- UR - umidade relativa do ar em porcentagem;
- u_{10} - velocidade do vento a 10 m de altura em km.dia^{-1} ;
- u_2 - velocidade do vento, a 2 m de altura em milhas.dia^{-1} ;
- u - contador de culturas;
- V_{pc} - vazão necessária para irrigar a célula c no período p,
em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$;
- w_1, w_2 - parâmetros do termo de advecção;
- x - abscissa de um curso d'água, dentro de sua sub-bacia,
em km;

EXTRATO

Costa, Marcos Heil, M.S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 1991. Modelo de Otimização dos Recursos Hídricos para Irrigação, Conforme a Época de Plantio. Professor Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Professores Conselheiros: Adil Rainier Alves e Daniel Marçal de Queiroz.

Propôs-se desenvolver, neste trabalho, um modelo para o consumo de água para fins de irrigação com o objetivo de prever, por meio de simulação, o impacto que teriam diferentes épocas de plantio adotadas pelos irrigantes de toda uma bacia hidrográfica na vazão dos cursos d'água dessa bacia, na época mais seca do ano.

O modelo desenvolvido é de natureza determinística e consiste em determinar, pelo método das tentativas, a combinação de épocas de plantio que levam a um melhor resultado na vazão dos cursos d'água na época seca.

O modelo é completamente configurável por meio de seus dados de entrada; o usuário pode selecionar a precisão dos

resultados obtidos em função da capacidade do computador disponível e do tempo de processamento do modelo.

O modelo mostrou-se sensível aos parâmetros de entrada testados, porém sua validação não pôde ser feita nesta parte do trabalho, em razão da complexidade da bacia hidrográfica simulada.

1. INTRODUÇÃO

Em meados da década de oitenta, a agricultura brasileira apresentava um quadro preocupante com a produção nacional de grãos, há vários anos, estacionada em torno de 50 milhões de toneladas anuais (Quadro 1).

QUADRO 1 - Produção Total de Grãos no País: 1980 - 1989
(em Toneladas)

Safra	Arroz	Feijão	Milho	Soja	Trigo	Total
1980	9.775.720	1.968.165	20.372.072	15.155.804	2.701.613	49.973.374
1981	8.228.326	2.340.947	21.116.908	15.007.367	2.209.631	48.903.179
1982	9.734.553	2.902.657	21.842.477	12.836.047	1.826.631	49.142.365
1983	7.741.753	1.580.546	18.731.216	14.582.347	2.236.700	44.872.562
1984	9.027.363	2.625.676	21.164.138	15.540.792	1.983.157	50.341.126
1985	9.024.555	2.548.738	22.018.180	18.278.585	4.320.267	56.190.325
1986	10.404.467	2.219.478	20.541.227	13.334.691	5.638.470	52.138.333
1987	10.421.592	2.019.460	26.786.647	16.813.832	5.889.395	61.930.926
1988	11.806.451	2.900.754	24.749.550	18.020.677	5.751.219	63.228.651
1989	11.088.289	2.334.353	26.631.836	24.096.810	5.140.289	69.291.577

Fonte: Retrospectiva da agropecuária, 1989

Os fracassos das tentativas de novas políticas agrícolas para melhorar a produção eram constantes, e as quebras de safra, provocadas pelas condições climáticas adversas, ocorriam freqüentemente. Apenas um panorama não se alterava: o crescimento da população, que incitava, a cada ano, maior demanda de alimentos. Se nada fosse feito no sentido de aumentar a produção nacional de grãos, em poucos anos iria faltar alimentos ou seria necessária a sua importação.

Para aumentar a produção de grãos, podia-se expandir a fronteira agrícola ou melhorar a produtividade; porém, a área plantada no país praticamente não variou ao longo dos últimos anos (Quadro 2) e, portanto, decidiu-se pelo aumento da produtividade.

QUADRO 2 - Área Plantada no País e Sua Taxa de Crescimento
(em Relação a 1980)

Safra	Arroz	Feijão	Milho	Soja	Trigo	Total	Tx. Crescim.
1980	6.243.130	4.643.409	11.451.297	8.774.023	3.122.107	34.233.966	1,000000
1981	6.101.772	5.026.925	11.520.336	8.501.169	1.920.142	33.070.344	0,966010
1982	6.024.657	5.926.143	12.619.531	8.203.277	2.827.929	35.601.537	1,039947
1983	5.108.250	4.064.028	10.705.979	8.137.112	1.879.078	29.894.447	0,873239
1984	5.351.472	5.320.150	12.018.446	9.421.202	1.741.673	33.852.943	0,988870
1985	4.754.692	5.315.890	11.798.339	10.153.405	2.676.725	34.699.051	1,013585
1986	5.584.979	5.477.688	12.465.836	9.181.587	3.864.255	36.574.345	1,068364
1987	5.979.792	5.201.791	13.503.431	9.134.291	3.455.897	37.275.202	1,088836
1988	5.960.984	5.904.551	13.181.978	10.523.629	3.480.418	39.051.560	1,140725
1989	5.269.317	5.206.731	12.935.960	12.210.326	3.298.267	38.920.601	1,136900

Fonte: Retrospectiva da agropecuária, 1989

Ao estudarem várias alternativas para o seu incremento, os técnicos do governo decidiram que o aumento da produtividade das culturas brasileiras deveria ser via irrigação de parte da área plantada. Assim, foram criados, em 1986, dois programas de financiamento e estímulo à irrigação: PROINE (Programa de Irrigação do Nordeste) e PRONI (Programa Nacional de Irrigação), que, com os já existentes, PRUFIR (Programa de Financiamento de Equipamentos de Irrigação) e PROVÁRZEAS (Programa Nacional para o Aproveitamento Racional de Várzeas Irrigáveis), tinham o objetivo de implantar, num prazo de cinco anos, três milhões de hectares irrigados em todo o território nacional, em especial na região Nordeste. Esse prazo foi, posteriormente, dilatado para oito anos, mas os reflexos foram imediatos: embora a área plantada tenha aumentado 6,4 % no período 1986-89, a produção de grãos aumentou 32,9 % no mesmo período, deixando a preocupante casa de 50 milhões de toneladas de grãos por ano e atingindo já a dos 70 milhões.

Entretanto, para um país que, até 1984, contava com 2,2 milhões de hectares irrigados (PRODUCTION YEARBOOK, 1984), irrigar mais três milhões em oito anos era uma tarefa que não poderia ser concluída sem os problemas causados pela alta taxa de implantação de sistemas de irrigação. Um desses problemas era a instalação indiscriminada de equipamentos de irrigação, sem avaliar a quantidade de água disponível para irrigação.

A maioria das áreas irrigadas no país usa recursos hídricos de superfície, e já há regiões onde a concentração de áreas irrigadas é tão elevada que o nível do rio baixa

drasticamente na época seca (época de maior demanda de irrigação), prejudicando, assim, o fornecimento de água aos irrigantes localizados a jusante.

No caso de conflitos de uso de água como esse, é muito importante que os direitos e as limitações de cada usuário estejam claramente definidos. É preciso criar, entre os usuários da água para irrigação, o sentido de que a água, em grande parte de nosso território, é um recurso limitado, e não um bem livre, sem dono, e que seu uso deve fazer-se segundo regras aceitas pela sociedade, que garantam os direitos de cada usuário sem prejuízo dos demais (STRAUSS, 1989).

Existem várias maneiras de solucionar tais problemas, que envolvem excesso de demanda hídrica. A primeira seria a venda da água de irrigação. O preço inicial poderia ser mais baixo, aumentando gradativamente até que se atingisse um equilíbrio. Essa medida é, sem dúvida, antipática, de difícil fiscalização e inviabiliza o cultivo irrigado de culturas menos nobres, como a maioria dos grãos. Uma outra solução, conforme MAASS *et alii* (1962), seria aumentar a disponibilidade de água na época de maior demanda, por meio da construção de reservatórios. Tornar-se-ia, entretanto, necessária a desapropriação de áreas agricultáveis e, conforme a demanda hídrica, é possível que o custo do reservatório fosse proibitivo. Além disso, é uma alternativa a médio prazo, pois envolve muitos recursos financeiros e tempo, até sua conclusão e início de operação. Por outro lado, essa alternativa apresenta a vantagem adicional de permitir, também, a geração de energia elétrica. Uma terceira

alternativa, talvez a mais racional, seria disciplinar o uso da água do rio, distribuindo a sementeira nas diversas propriedades dentro do período possível de plantio para as culturas irrigadas. Os picos de consumo de água, por propriedade, não coincidiriam entre si e a demanda seria suavizada. É uma medida que pode amenizar o problema ou até mesmo resolvê-lo, conforme a sua magnitude. Como desvantagem, esta medida apresenta o fato da difícil implantação e fiscalização.

O estudo de problemas desta natureza pode ser justificado pelo aumento do número potencial de irrigantes em regiões de pouca oferta hídrica e pelas conseqüentes melhorias sociais e na produção agrícola.

Tendo em vista os pontos anteriormente levantados, este trabalho tem como objetivos principais:

- (a) simular o consumo de água dos cursos d'água de uma bacia hidrográfica, para fins de irrigação, conforme as épocas de plantio das culturas irrigadas;
- (b) determinar as épocas do ano para o plantio, em cada propriedade, de modo que o consumo do recurso hídrico de superfície para fins de irrigação seja mínimo.

2. METODOLOGIA

2.1. Enfoque Geral

Para se resolver um problema para o qual ainda não existe uma metodologia-padrão para solucioná-lo, segue-se o procedimento descrito no fluxograma da Figura 1, apresentado por EMSHOFF e SISSON (1970).

Definido o problema, que neste trabalho é determinar a época de plantio em cada propriedade de modo que o consumo de água de irrigação seja mínimo, pode-se chegar à sua solução de quatro diferentes maneiras, como mostra a Figura 1.

O método intuitivo, dada a complexidade do referido problema e a sua natureza quantitativa, provavelmente não teria sucesso.

O segundo método, enumeração e experimentação de alternativas, foi discutido anteriormente. Obviamente, em face da magnitude do problema, não é viável realizar experimentos para selecionar a melhor alternativa, sem que isso comprometa

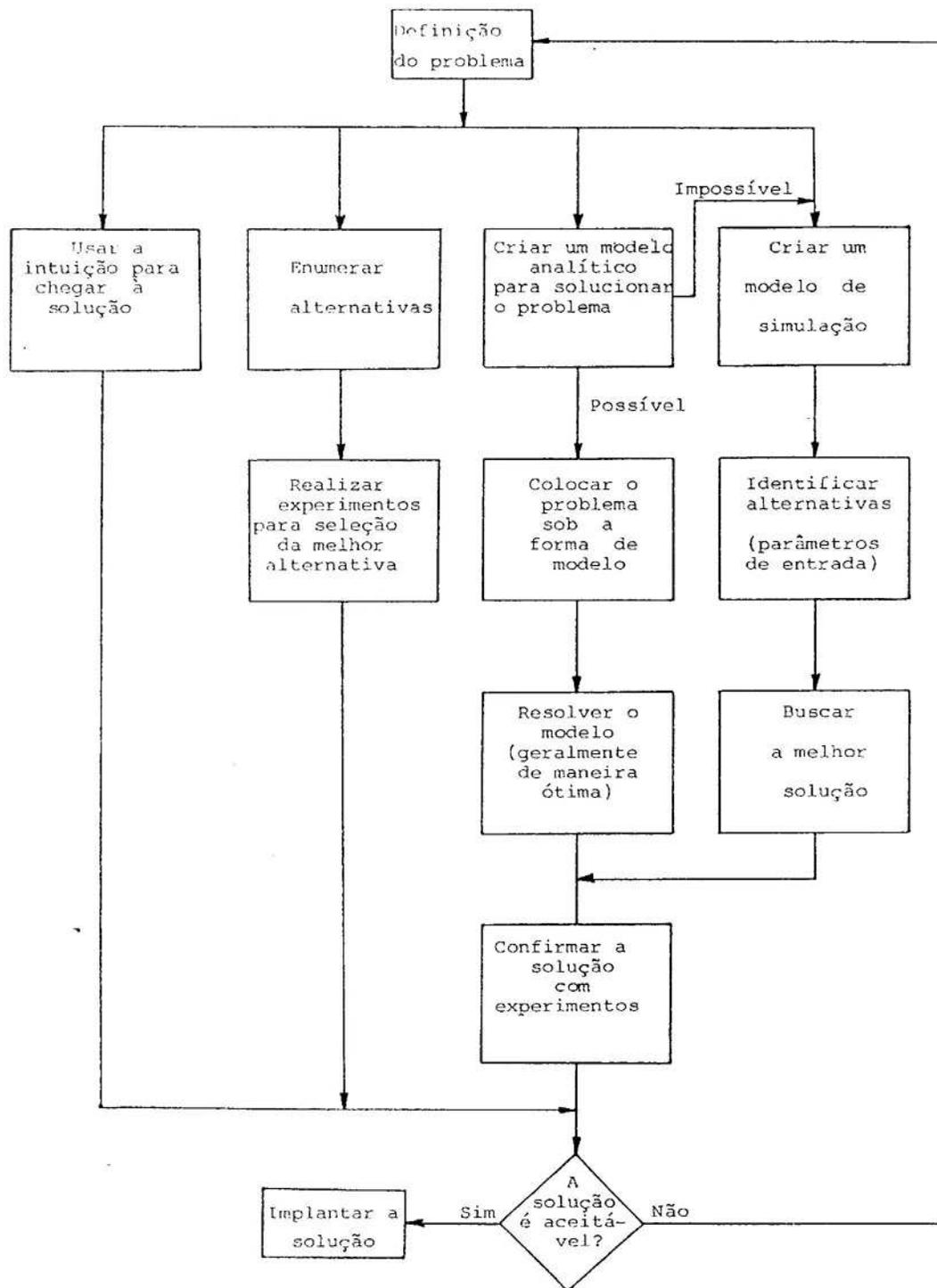


FIGURA 1 - Procedimento a Ser Seguido na Solução de um Problema.

a produção agrícola e o padrão de vida da população de toda uma região.

Criar um modelo de solução analítica é inviável tecnicamente pela não-linearidade das equações, pelo grande número de variáveis explicativas que fariam parte do modelo e, principalmente, pela presença de variáveis endógenas defasadas.

Assim, a alternativa mais viável é simular o funcionamento do sistema, variando-se os parâmetros de entrada até encontrar a melhor alternativa para a solução do problema, isto é, simular o efeito de diferentes épocas de plantio no consumo de água de irrigação. A fase seguinte, a de confirmar a solução com experimentos, poderá ser executada em um trabalho posterior; caso a solução apresentada mostre-se impraticável por alguma razão, então volta-se ao início do fluxograma e tenta-se outra das alternativas propostas.

2.2. Modelo de Simulação Adotado

A simulação de um sistema envolve tanto a construção de um modelo como a sua utilização para análise do sistema que ele representa.

Um modelo de simulação computacional é essencialmente um modelo matemático, isto é, a representação do sistema por meio de parâmetros constantes e variáveis, que simbolizem os componentes e fatos, e equações que descrevam as interações ou sua interdependência.

O objetivo principal, ao se desenvolver um modelo de simulação, é obter uma representação realística do

comportamento do sistema (EMSHOFF e SISSON, 1970). A escolha do tipo de modelo correto, determinístico ou estocástico, é fundamental para se atingir este objetivo. Num modelo determinístico, o resultado da simulação é função apenas dos parâmetros de entrada, enquanto nos estocásticos variáveis aleatórias são introduzidas e cada simulação fornece um resultado diferente, devendo estes serem analisados estatisticamente.

A escolha do tipo de modelo mais adequado pode ser baseada em evidências externas sobre o fenômeno em estudo ou na presença de variáveis aleatórias no sistema. Se dados históricos ou observações diretas sugerem que variações inexplicáveis ocorrem em alguns fenômenos em estudo, então o fenômeno pode ser representado como um processo estocástico (EMSHOFF e SISSON, 1970). Geralmente, nesses casos, é inviável economicamente buscar uma causa determinística para o fenômeno.

Em certos sistemas, todas as variáveis de relevância são conhecidas, entretanto algumas dessas variáveis são aleatórias. Nesse caso, em geral, o modelo é estocástico, sendo usado para avaliar o impacto que teria a variação de um certo parâmetro no desempenho de todo o sistema.

A simulação determinística apresenta algumas vantagens em relação à estocástica, como redução do volume de cálculo necessário, interpretação simplificada dos resultados, facilidade de validação do modelo, dentre outras.

Todavia, dado que dificilmente se conhece com certeza todas as variáveis envolvidas num sistema, a simulação

estocástica geralmente fornece resultados mais confiáveis que a determinística.

Dessa forma, alguns autores (EMSHOFF e SISSON, 1970 e NEMHAUSER, 1966) recomendam o uso preliminar de um modelo determinístico a fim de validá-lo facilmente e, então, fazer a simulação estocástica, que é mais confiável.

De acordo com NEMHAUSER (1966), na verdade, a simulação determinística é um caso particular da estocástica, em que cada variável aleatória assume um valor particular com probabilidade um e todos os demais valores com probabilidade zero. No caso específico deste trabalho, a principal variável exógena simulada é o consumo de água de irrigação, onde a lâmina d'água aplicada depende da precipitação e da evapotranspiração, que são variáveis aleatórias. Além disso, é necessário o conhecimento da vazão do curso d'água no tempo e no espaço, isto é, na propriedade irrigada e na época em que a irrigação for solicitada, o que também é uma variável aleatória.

Apesar do modelo em questão possuir variáveis aleatórias em sua composição, a simulação pode ser feita de maneira determinística, substituindo-se o valor aleatório por um valor fixo, com uma certa probabilidade de ocorrência. Desta maneira, troca-se a aleatoriedade da variável pela sua probabilidade de ocorrência, o que é uma vantagem, pois um valor antes desconhecido torna-se um valor que pode ser empregado sob um risco conhecido.

Fixar os valores das três variáveis (precipitação, evapotranspiração e vazão) não é tão simples e merece alguma

discussão. Estas três variáveis apresentam variações

(a) espaciais, conforme a localização da propriedade irrigada dentro da região em estudo;

(b) anuais, de ano para ano;

(c) sazonais, conforme a época do ano.

A área de contribuição da sub-bacia é fator importante na vazão de um curso d'água, por isso a sua variação espacial é elevada e deve ser considerada no modelo.

Apesar do relevo, da altitude, da latitude e da proximidade do mar influenciarem na evapotranspiração, a sua variação espacial é muito pequena; pode-se considerar que uma região, conforme o seu tamanho, pode ser representada apenas por um ponto de observação.

Conforme a região, a precipitação varia fortemente durante o ano. A vazão dos cursos d'água, por ser altamente dependente da precipitação, segue o mesmo padrão de comportamento. Já a evapotranspiração apresenta uma variação de menor amplitude ao longo do ano. Em vista disso, torna-se mister a divisão do ano em períodos, suficientemente pequenos, de modo que o efeito dessa variação ao longo do ano seja incorporada no modelo.

No desenvolvimento do modelo de simulação, cada mês foi considerado como um período de duração variável entre 28 e 31 dias. Os períodos foram ordenados de um a 12, sendo o período número um aquele equivalente ao mês de janeiro.

A variação de ano para ano segue diferentes distribuições de probabilidade, conforme a variável. Para eliminar esta variação, utiliza-se, então, um valor associado

a uma certa probabilidade de ocorrência. Esta probabilidade é escolhida de acordo com a finalidade para a qual o valor será utilizado. No caso deste trabalho, que tem fins agrícolas, o valor utilizado é aquele que tem 75 % de probabilidade acumulada de ocorrência, ou seja, que deve ocorrer, no mínimo, em três a cada quatro anos.

As três variáveis aleatórias passam então a ser fixas, conforme o período e a localização espacial.

2.3. Diagrama de Blocos do Modelo

O modelo simplificado da simulação determinística é apresentado na Figura 2.

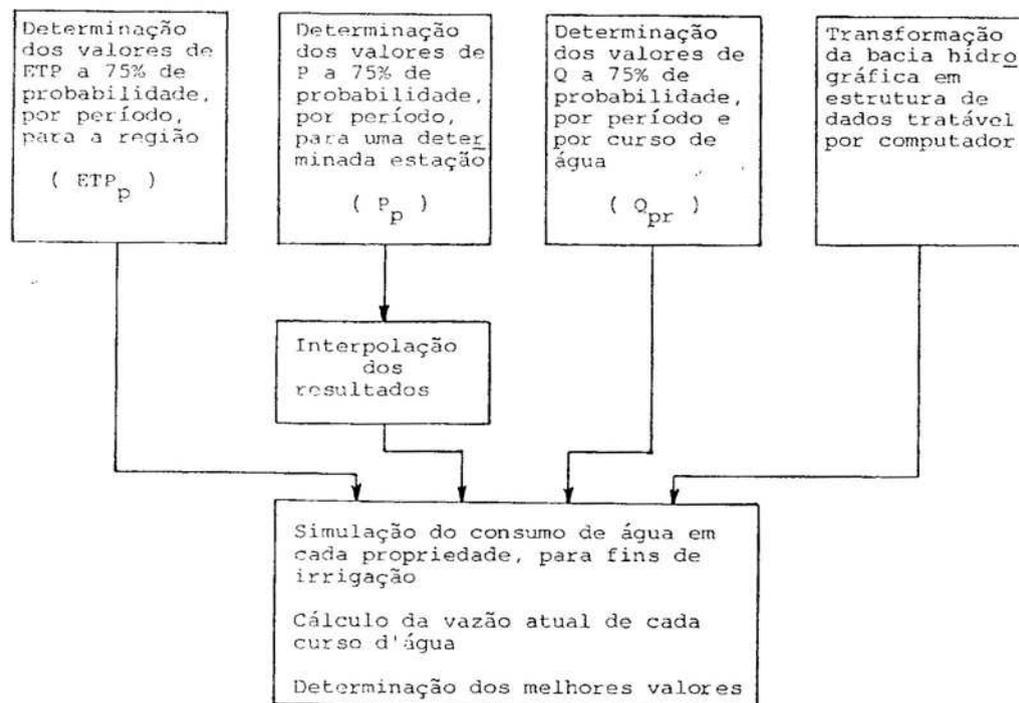


FIGURA 2 - Diagrama de Blocos do Modelo de Simulação.

Pode-se verificar que o trabalho se divide em cinco etapas principais:

(a) determinação dos valores de evapotranspiração potencial a 75 % de probabilidade, para cada período do ano, para a região em estudo;

(b) determinação dos valores de precipitação a 75 % de probabilidade, para cada período do ano e conforme a localização dentro da região em estudo;

(c) determinação dos valores de vazão de todos os cursos d'água da área em estudo, a 75 % de probabilidade, por período do ano; organização da bacia hidrográfica em uma forma tratável por programas de computador;

(d) determinação dos valores de coeficiente de cultura para cada cultura a ser irrigada, para cada período de seu ciclo e em épocas de plantio diferentes;

(e) simulação do consumo de água de irrigação em cada propriedade em cada período do ano, conforme a época de plantio e, em seguida, cálculo da vazão atual de cada curso d'água; por fim, seleção da melhor combinação de épocas de plantio. Prosseguir no próximo curso d'água e, assim, sucessivamente até o fim da bacia hidrográfica.

Observa-se que, das cinco etapas acima descritas, as quatro primeiras são destinadas apenas a obter os dados que irão alimentar o modelo de simulação, cujo desenvolvimento faz parte da quinta etapa.

2.4. Região de Estudo

O modelo foi utilizado para avaliar as condições da bacia do rio Verde Grande, localizada ao norte do Estado de Minas Gerais, que pode ser vista na Figura 3. Trata-se de uma região de grande investimento em irrigação; na estação de ano de alta demanda hídrica dos cultivos daquela região, o rio Verde Grande encontra-se com o seu curso d'água em menor vazão. Isso faz com que ele se torne intermitente em alguns trechos de sua bacia na época da seca. Assim, foi selecionada, para estudo, a sub-bacia do trecho mais a montante da bacia, onde os problemas de intermitência já se manifestam.

A região abrange o município de Juramento e parte dos municípios de Bocaiúva, Montes Claros, Francisco Sá e Capitão Enéas. Está situada entre as latitudes de $16^{\circ}18'S$ e $17^{\circ}03'S$ e as longitudes de $43^{\circ}24'W$ e $44^{\circ}02'W$, com uma área aproximada de 3780 km^2 . As altitudes encontradas na região variam entre 550 m e 900 m. A vegetação da região é do tipo caatinga (FUNDAÇÃO CETEC, 1983).

2.5. Determinação da Evapotranspiração Potencial

Existem diversos métodos para a determinação da ETP. Neste trabalho, a ETP foi calculada pelo método modificado de Penman, descrito por SEDIYAMA (1987) ou, quando os dados disponíveis não foram suficientes, utilizou-se o método da radiação (ou método modificado de Makking), descrito por DOORENBOS e PRUITT (1977).

2.5.1. Método de Penman

Em 1963, Penman sugeriu uma equação para o cálculo da evapotranspiração potencial, que, após algumas modificações, é apresentada da seguinte forma:

$$ETP = \frac{10}{L} \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (15,36)(w_1 + w_2 \cdot u_2)(e_s - e_a) \right] \quad \text{eq. 2.1}$$

em que:

ETP - evapotranspiração potencial diária em mm;

L - calor latente de vaporização, em cal.cm^{-3} ;

$$L = 595 - 0,51 \cdot T_m \quad \text{eq. 2.2}$$

T_m - temperatura média do período em questão, em $^{\circ}\text{C}$;

Δ - declividade da curva de pressão de saturação versus temperatura (de_s/dT), determinada na temperatura média ar ($\text{mb.}^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ - constante psicrométrica em $\text{mb.}^{\circ}\text{C}^{-1}$;

R_n - saldo diário de radiação sobre a superfície do solo em cal.cm^{-2} ;

G - fluxo diário de calor no solo, em cal.cm^{-2} ;

w_1 e w_2 - parâmetros do termo de advecção; os valores de w_1 e w_2 para o solo coberto por grama são 1,00 e 0,0161, respectivamente;

u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura em milhas.dia^{-1} ;

e_s - pressão de saturação do vapor d'água, para a temperatura média diária, em mb;

e_a - pressão atual de vapor em mb.

As seguintes equações são necessárias para calcular os demais termos da equação 2.1:

$$\gamma = \frac{C_p \cdot \text{Pres}}{0,622 \cdot L} \quad \text{eq. 2.3}$$

em que:

C_p - calor específico do ar a pressão constante, tomado como $0,24 \text{ cal.cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

Pres - pressão atmosférica local em mb;
 $\text{Pres} = 1013 - 0,01061 \cdot \text{Alt}$ eq. 2.4

Alt - altitude em m;

$$\Delta = 2,00 (0,00738 \cdot T_m + 0,8072)^7 - 0,00116 \quad \text{eq. 2.5}$$

$$R_n = (1 - \text{alb}) R_s + R_b; \quad \text{eq. 2.6}$$

em que:

alb - coeficiente de reflexão da superfície do solo para a radiação solar, ou albedo; neste trabalho, em se tratando de uma superfície coberta completamente por grama, considerou-se $\text{alb} = 0,23$;

R_s - irradiância solar global diária sobre a superfície em cal.cm^{-2} ;

R_b - balanço diário de radiação de ondas longas sobre a superfície em cal.cm^{-2} ;

A expressão mais difundida para o cálculo da irradiância solar global é aquela proposta por ANGSTRÖM (1924), e posteriormente modificada por PRÉSCOTT (1940):

$$R_s = R_{s_0} (a + b (n/N)); \quad \text{eq. 2.7}$$

em que:

R_{s_0} - irradiância solar diária numa superfície horizontal no topo da atmosfera em cal.cm^{-2} ;

a, b - constantes da equação de Angstrom que, para latitudes entre 0° e 60° , podem ser determinadas pela metodologia proposta por GLOVER e McCULLOCH (1958), como recomenda IQBAL (1983):

$$a = 0,29 \cos \phi \quad \text{eq. 2.8}$$

$$b = 0,52 \quad \text{eq. 2.9}$$

ϕ - latitude do local, em graus;

$$R_{s_0} = 889,23 \left(\bar{D}/D\right)^2 \left[H \begin{matrix} \text{sen}(\phi) & \text{sen}(\delta) \\ \cos(\phi) & \cos(\delta) \end{matrix} \text{sen}(H) \right] \quad \text{eq. 2.10}$$

em que :

$(\bar{D}/D)^2$ - fator de correção da excentricidade da órbita da Terra ao redor do Sol, que pode ser determinada pela expressão desenvolvida por SPENCER (1971):

$$\begin{aligned} (\bar{D}/D)^2 = & 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos(\theta) + 0,001280 \cdot \text{sen}(\theta) + \\ & + 0,000719 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + 0,000077 \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta); \end{aligned} \quad \text{eq. 2.11}$$

sendo

θ - ângulo relativo ao dia juliano, isto é,

$$\theta = 2 \pi (\text{dia}-1)/365 \quad \text{eq. 2.12}$$

dia - ordem do dia no ano (dia juliano), adimensional;

H - ângulo horário correspondente ao nascer e pôr do Sol, em radianos, isto é,

$$H = \arccos (- \tan(\phi) \tan(\delta)) \quad \text{eq. 2.13}$$

δ - declinação do Sol, que pode ser calculada por:

$$\delta = 0,40928 \cos(2\pi(\text{dia}-172)/365); \quad \text{eq. 2.14}$$

n - número de horas de brilho solar diário;

N - duração astronômica do dia, em horas, calculada como:

$$N = \frac{2}{15} H \frac{180}{\pi} \quad \text{eq. 2.15}$$

O balanço diário de radiação de ondas longas sobre a superfície do solo pode ser estimado por meio da seguinte expressão, proposta por BRUNT (1932):

$$R_b = 1,1713 \times 10^{-7} (T_m + 273,2)^4 (0,09 \sqrt{e_a} - 0,56) \quad \text{eq. 2.16}^*$$

$$(0,1 + 0,9 n/N)$$

$$G = \frac{T_{m_{i-1}} - T_{m_i}}{\Delta t} K \quad \text{eq. 2.17}$$

em que:

T_{m_i} - temperatura média diária para o período i em $^{\circ}\text{C}$;

Δt - intervalo de tempo, em dias, entre os pontos médios de dois períodos;

K - constante de proporcionalidade igual a $1 \text{ mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

A magnitude de G , na maior parte das vezes, é muito menor que a dos demais termos da Equação 2.1, podendo, portanto, ser desprezado.

$$e_s = 1,3329 \exp \left[21,07 - \frac{5336,0}{T_m + 273,2} \right] \quad \text{eq. 2.18}$$

$$e_a = UR e_s / 100 \quad \text{eq. 2.19}$$

em que:

UR : umidade relativa do ar em porcentagem.

A velocidade do vento, em estações climatológicas, é medida a 10 metros de altura, e normalmente o anemômetro fornece o valor em $\text{km} \cdot \text{dia}^{-1}$. Para se transformar este valor

* Na equação 2.16, e_a está expresso em mmHg;

para a velocidade do vento a 2 metros de altura, e em milhas.dia⁻¹, pode-se fazer uso da seguinte relação:

$$u_2 = \frac{u_{10}}{1,609} \left[\frac{2}{10} \right]^{0,1428}, \quad \text{eq. 2.20}$$

em que:

u_{10} : velocidade do vento a 10 m de altura em km.dia⁻¹.

Da maneira como as equações anteriores foram colocadas, pode-se reduzir o método de Penman como função de apenas oito variáveis básicas, que são características do local ou então são correntemente mensuradas em estações climatológicas, como mostra o Quadro 3:

QUADRO 3 - Variáveis Utilizadas na Determinação da ETP pelo Método de Penman

Variável	Símbolo	Característica do local/época	Medida em estações
Latitude	ϕ	X	
Altitude	alt	X	
Época do ano	dia	X	
Temperatura média	T_m		X
Velocidade do vento, 10 m	u_{10}		X
Umidade relativa do ar	UR		X
Insolação	n		X
Temp. média, período anterior	$T_{m_{i-1}}$		X

Dentre as oito variáveis apresentadas no Quadro 3, pode-se eliminar a temperatura média do período anterior, pois só é utilizada no cálculo do fluxo de calor no solo, o qual é frequentemente desprezado no cálculo da ETP.

Mesmo assim, ainda é necessário obterem-se cinco parâmetros climatológicos de um mesmo período, o que nem sempre é possível, pois os registros de dados das estações climatológicas brasileiras normalmente são incompletos.

Desta maneira, e como uma alternativa, quando não se dispuser dessas cinco variáveis, far-se-á uso do método da radiação para a estimativa da ETP.

2.5.2. Método da Radiação

Originalmente proposto por Makking, em 1957 (citado por JENSEN, 1973), este método foi adaptado pela FAO (DOORENBOS e PRUITT, 1977) e é recomendado para regiões onde os dados climáticos medidos incluem temperatura do ar, insolação ou radiação, mas não se mede velocidade do vento nem umidade relativa do ar. Entretanto, o conhecimento de níveis gerais de umidade e vento são necessários, que podem ser obtidos de outros períodos na mesma região ou de extrapolações de outras áreas próximas.

Segundo DOORENBOS e PRUITT (1977), esse método, em condições extremas, admite um erro máximo de 20 %, no verão.

A relação recomendada é expressa por:

$$ETP = f.W.R_s' \quad \text{eq. 2.21}$$

em que:

f - fator de ajustamento, que depende da umidade média e das condições de vento durante o dia;

$$W = \Delta / (\Delta + \gamma); \quad \text{eq. 2.22}$$

R_s' - radiação solar equivalente à evaporação em mm.dia^{-1} , isto é:

$$R_s' = 10 R_s/L; \quad \text{eq. 2.23}$$

L , γ , Δ e R_s podem ser obtidos por meio das equações 2.2, 2.3, 2.5 e 2.7, respectivamente. O coeficiente f , por sua vez, não é fornecido diretamente por meio de alguma tabela ou equação. No método proposto por DOORENBOS e PRUITT (1977), o coeficiente f é usado de uma maneira indireta, isto é, entra-se com o produto $W.R_s'$ em um ábaco e, conforme as condições de vento e umidade, tira-se o valor de ETP desse ábaco. Considerando-se que no presente trabalho todos os cálculos foram feitos por computadores, transformou-se o ábaco em equações matemáticas, num total de 16 equações do tipo

$$ETP = a_0 + b_0.(W.R_s') \quad \text{eq. 2.24}$$

Este tipo de solução foi adotado também por MOTA *et alii* (1989), a fim de converter ábacos em equações.

Os coeficientes a_0 e b_0 são mostrados no Quadro 4:

2.5.3. GeraETP : O Programa para Calcular ETP

Foi escrito um programa de computador em linguagem Pascal para calcular a ETP de um dado período do ano, em função das coordenadas geográficas do local e de dados climatológicos. Para a escrita, compilação e montagem do programa foi utilizado o compilador Turbo-Pascal, versão 5.5, que montou um programa executável em microcomputadores do tipo IBM-PC em ambiente DOS. O diagrama de blocos do programa está

QUADRO 4 - Coeficientes para Correção do Produto (W.Rs') em ETP, Conforme a Equação 2.24

Umidade relat. (%)	Velocidade do vento durante o dia (m/s)				
		0 - 2	2 - 5	5 - 8	> 8
> 70	a ₀	-0,63	-0,52	-0,62	-0,55
	b ₀	0,833	0,870	0,948	0,985
50-70	a ₀	-0,46	-0,67	-0,44	-0,47
	b ₀	0,891	0,995	1,015	1,084
40-55	a ₀	-0,54	-0,33	-0,16	-0,18
	b ₀	0,990	1,042	1,090	1,183
< 40	a ₀	-0,40	-0,37	-0,28	-0,20
	b ₀	1,024	1,136	1,193	1,267

esquematizado na Figura 4 e a listagem completa do programa está no Apêndice B.

2.5.4. Evapotranspiração Potencial Provável

Pelas razões apresentadas anteriormente, utilizou-se o valor de ETP que tem 75 % de probabilidade acumulada de ocorrer. Para se determinar esse valor, é necessário que se saiba a que distribuição de frequências os dados se ajustam.

De acordo com alguns pesquisadores, como McGUINNESS e PARMELE (1972), NIXON *et alii* (1972), PRUITT *et alii* (1972), ROSENBERG (1972), WRIGHT e JENSEN (1972), os valores da evapotranspiração seguem uma distribuição normal, mesmo para períodos de curta duração.

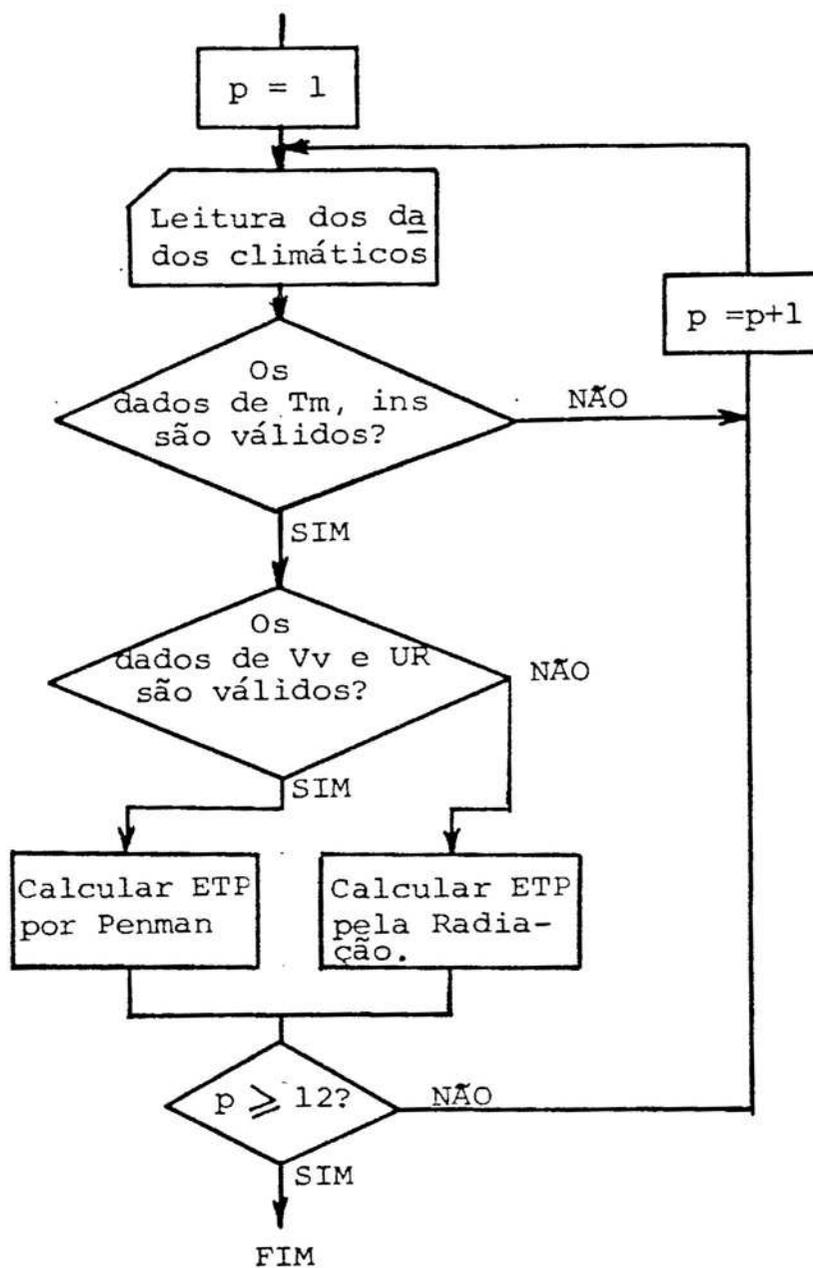


FIGURA 4 - Diagrama de Blocos do Programa GeraETP.

Assim, para se determinar o valor de ETP que tem 75 % de probabilidade acumulada de ocorrer, tomou-se uma série de dados de ETP de um mesmo período do ano e calculou-se a sua média ($\hat{\mu}$) e o seu desvio padrão $\hat{\sigma}$, que são estimadores dos verdadeiros parâmetros μ e σ da evapotranspiração potencial da região. O valor de ETP que tem 75 % de probabilidade (acumulada) de ocorrer foi calculado por

$$\text{ETP}(75\%) = \hat{\mu} + 0,675 \hat{\sigma}, \quad \text{eq. 2.25}$$

sendo a constante 0,675 extraída de tabelas da distribuição normal (SPIEGEL, 1973). Para ilustrar, segue-se a Figura 5. Note-se que o valor ETP(75 %) pode também ser interpretado como "Há 75 % de probabilidade que evapotranspire ETP(75%) mm ou menos."

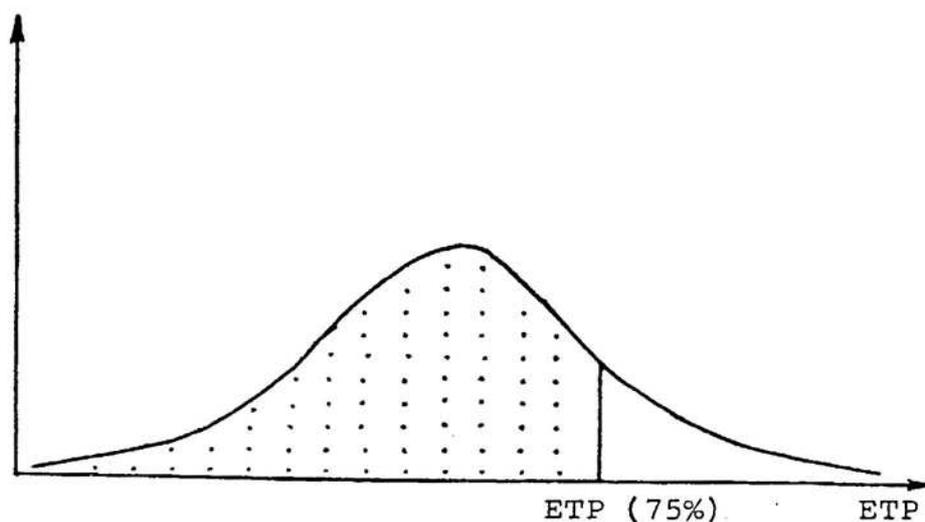


FIGURA 5 - Distribuição dos Dados de Evapotranspiração Potencial e a Posição do Valor que Tem 75 % de Probabilidade de Ocorrer.

2.5.5. Dados Utilizados na Determinação da ETP

Na bacia do rio Verde Grande, existem cinco estações climatológicas, todas controladas pelo DNEMET e cujas características estão no Quadro 5.

QUADRO 5 - Características das Estações Climatológicas da Bacia do Rio Verde Grande

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Altitude	Séries disponíveis		
						Início	Fim	Total
83437	Montes Claros	Montes Claros	16° 43'	43° 52'	646	1969	1978	10
83388	Monte Azul	Monte Azul	15° 09'	42° 53'	604	1974	1978	5
83395	Janaúba (Ruralminas)	Janaúba	15° 47'	43° 18'	516	1977	1978	2
83452	Juramento	Juramento	16° 47'	43° 43'	750			-
83338	Espinosa	Espinosa	14° 56'	42° 49'	570	1974	1978	5

Fonte: BRASIL (1987)

Conforme pode ser visto na Figura 3, apenas as estações de Montes Claros (código 83437) e Juramento (código 83452) estão dentro da área em estudo. Como a estação de Juramento é muito recente, tendo sido criada em 1985, apenas os dados de Montes Claros foram considerados no estudo.

2.5.6. Dados de Evapotranspiração Potencial

Após o processamento do programa GeraETP, foram obtidos os valores de ETP, apresentados no Quadro 6. Este Quadro mostra ainda a média, o desvio-padrão, o coeficiente de

QUADRO 6 - Dados de ETP, em mm, para Montes Claros

Anos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1967	77,93	100,65	107,93	98,33	81,60	69,90	72,15			119,63		
1968				93,38			72,60			113,40	90,98	98,25
1969	117,95		111,42	93,63	82,38	67,87	78,36	103,59	125,78	112,18	99,18	82,84
1970	90,75	96,38	117,98			72,68	72,90	95,63	102,30	85,80	98,18	
1971	117,18	95,58	81,20	94,37	76,95	72,56	74,86	94,03	92,68	77,83	78,10	100,85
1972	116,85	111,45	74,55	95,18	81,60	75,23	84,30	102,53	125,25	100,20	100,13	108,08
1973	130,96	113,60	129,20	85,36	87,20	78,32	84,40	114,08	124,64	107,52	91,84	140,80
1974	146,85	109,73	126,45	113,40	81,53	84,08	84,08	109,50	94,65	107,25	80,18	85,58
1975	105,07	113,96	135,88	89,47	78,55	66,69	87,91	112,32	101,87	126,36	105,77	107,25
1976	114,75	78,83	96,68	77,55	69,08	63,30	63,38	91,05	102,90	106,35	88,35	101,25
μ	113,1	102,5	109,0	93,4	79,9	72,3	77,5	102,8	108,8	105,7	92,5	103,1
σ	19,20	11,38	20,09	9,19	4,94	5,98	7,26	8,14	13,21	13,90	8,76	16,63
C.V.	0,17	0,11	0,18	0,10	0,06	0,08	0,09	0,08	0,12	0,13	0,09	0,16
ETP(75X)	126,1	110,2	122,6	99,6	83,2	76,3	82,4	108,3	117,7	115,0	98,4	114,3

variação e o valor de ETP com 75 % de probabilidade de ocorrer em cada período (mês) do ano.

Os resultados ausentes (em branco) indicam que os dados não permitiram calcular a ETP por nenhum dos métodos utilizados (Penman ou Radiação).

2.6. Culturas Irrigadas

Conforme levantamento realizado na região em estudo, as principais culturas irrigadas são o algodão, o feijão e o milho, que ocupam aproximadamente 20%, 70% e 10% da área irrigada durante a época seca, respectivamente. Como não há informação cadastrada a respeito da cultura cultivada em cada propriedade e como ocorrem variações devido a fatores diversos, o modelo foi alimentado com uma disposição aleatória

dessas três culturas pelas propriedades, respeitando, porém, as proporções citadas.

Foram consideradas as seguintes profundidades efetivas máximas dos sistemas radiculares das culturas: algodão (25 cm), feijão (15 cm) e milho (20 cm), que podem parecer rasas à primeira vista, mas são adequadas aos solos adensados daquela região.

2.7. Coefficiente de Cultura

Como se sabe, a quantidade de água evapotranspirada realmente (ETR) é diferente da quantidade de água que, potencialmente, poderia ser evapotranspirada (ETP). Muitos pesquisadores, entre eles Tanner e Monteith, citados por JENSEN (1973), relacionaram essas duas quantidades com os parâmetros r_a e r_i (resistência à difusão externa e interna da planta, respectivamente).

Estudos paralelos, considerando simplesmente a razão ETR/ETP, mostraram ser esta relação constante para uma mesma cultura numa mesma fase de seu ciclo. Assim, em 1968 Jensen definiu a razão como "coeficiente de cultura" (JENSEN, 1973).

$$K_c = \frac{ETR}{ETP} \quad \text{eq. 2.26}$$

De acordo com DOORENBOS e PRUITT (1977), o valor do coeficiente de cultura é afetado principalmente pelas características da cultura, pelo estágio de crescimento da mesma, pelo comprimento do seu ciclo e pelas condições climatológicas. Particularmente durante o início da estação

de crescimento, a freqüência das chuvas ou da irrigação é importante.

A época de plantio afeta o coeficiente de cultura de maneira indireta, pois tem influência no ciclo da cultura e na sua taxa de crescimento.

Desta maneira, os coeficientes de cultura devem ser determinados para cada cultura, em todo o seu ciclo, em cada época de plantio e em cada região. Apesar de existirem algumas fórmulas e gráficos para a determinação dos valores de K_c , a melhor maneira de determiná-los é ainda experimentalmente.

2.7.1. Valores Utilizados na Simulação

Tendo em vista a não existência na literatura de dados de coeficiente de cultura para cada época de plantio, tornou-se necessário estabelecer uma metodologia própria para a obtenção destes valores, conforme os critérios descritos em seguida:

Partiu-se dos valores dos coeficientes de cultura usados para o algodão, o feijão e o milho), na região Norte de Minas Gerais. Estes valores são adotados pelos técnicos da Cooperativa de Irrigantes do Vale do Gortuba (COVAG), cuja área de atuação é imediatamente ao norte da região em estudo, mas dentro, ainda, da bacia do rio Verde Grande e podem ser vistos no Quadro 7.

QUADRO 7 - Coeficientes de Cultura Adotados pela COVAG

Cultura	Estádios			
	I	II	III	IV
Algodão	0,35	0,75	1,15	0,65
Feijão	0,35	0,70	1,10	0,30
Milho	0,35	0,70	1,10	0,55

Fonte: DOORENBOS e PRUITT (1977) (Adaptado)

Os estádios compreendem as seguintes fases do ciclo das culturas:

- I - da emergência até 10% do desenvolvimento vegetativo;
- II - de 10% do desenvolvimento vegetativo até a floração;
- III- da floração à maturação;
- IV - da maturação à colheita.

O passo seguinte consistiu em se determinar o comprimento de cada estágio para cada uma dessas culturas e relacioná-lo com a temperatura do período de duração de cada estágio da cultura. COELHO (1978) comparou vários métodos que relacionam a temperatura do ar com o comprimento do ciclo do milho (graus-dia, função temperatura etc.) e concluiu que o melhor era o método da função temperatura (FT), descrito resumidamente a seguir.

Em função da temperatura média diária, cada dia recebia um valor de FT correspondente, o qual é calculado por meio das seguintes equações, de acordo com a faixa de temperatura:

$$\begin{array}{llll}
 FT = 0,0266 T - 0,1596, & 6^{\circ}\text{C} < T < 21^{\circ}\text{C} & \text{eq. 2.27} \\
 FT = 0,0857 T - 1,399, & 21^{\circ}\text{C} < T < 28^{\circ}\text{C} & \text{eq. 2.28} \\
 FT = 1,0000 & , & 28^{\circ}\text{C} < T < 32^{\circ}\text{C} & \text{eq. 2.29} \\
 FT = - 0,0833 T + 3,67 & , & 32^{\circ}\text{C} < T < 44^{\circ}\text{C} & \text{eq. 2.30}
 \end{array}$$

Os valores de FT são acumulados diariamente até o final de cada estágio e sucessivamente até o último. O mesmo procedimento pode ser utilizado para se determinar a duração total do ciclo de cada cultura. Os valores de FT acumulados, por estágio, para as três culturas, estão no Quadro 8.

QUADRO 8 - Valores de FT Acumulados por Estádio do Ciclo das Culturas de Algodão, Feijão e Milho

Cultura	FT Acumulado			
	Estádios			
	I	II	III	IV
Algodão	10,3	43,6	69,2	87,2
Feijão	6,0	25,3	38,5	42,9
Milho	7,7	35,8	55,2	70,2

Partindo-se dos totais de FT acumulados (Quadro 8) e utilizando-se os dados médios de temperatura de cada mês do ano, os dados de coeficiente de cultura para a região (Quadro 7) e a metodologia proposta por DOORENBOS e PRUITT (1977) para interpolação dos valores de coeficiente de cultura dentro de um ciclo, chegou-se aos dados dos Quadros 9 a 11, que ilustram os dados mensais de coeficiente de cultura para algodão, feijão e milho, em 12 épocas de plantio durante o ano na região Norte de Minas Gerais:

QUADRO 11 - Coeficientes de Cultura para Milho Plantado em 12 Diferentes Épocas de Plantio, para o Norte do Estado de Minas Gerais

Época de Plantio	Coeficientes de Cultura											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Jan	0,50	0,93	1,15	0,72								
Fev		0,50	0,93	1,15	0,78							
Mar			0,50	0,93	1,15	1,00	0,65					
Abr				0,45	0,75	1,05	1,15	0,97	0,60			
Mai					0,38	0,65	0,95	1,15	0,97	0,60		
Jun						0,38	0,65	0,95	1,15	0,87		
Jul							0,38	0,65	0,95	1,15	0,72	
Ago								0,40	0,80	1,12	0,97	0,60
Set									0,50	0,93	1,15	0,78
Out	0,72									0,50	0,93	1,15
Nov	1,15	0,72									0,50	0,93
Dez	0,93	1,15	0,72									0,50

Utilizando-se o mesmo procedimento, foram determinados os comprimentos dos ciclos das culturas, conforme a época de plantio, que estão no Quadro 12:

QUADRO 12 - Duração do Ciclo das Culturas, em Dias, Conforme a Época de Plantio

Cultura	Época de Plantio											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Algodão	160	190	190	200	190	190	180	160	150	150	150	150
Feijão	70	70	80	100	110	110	90	80	70	70	70	70
Milho	110	120	140	160	160	150	140	130	120	110	110	110

Os valores dos Quadros 9 a 12 foram usados na alimentação do modelo.

2.8. Precipitação Pluvial na Região em Estudo

2.8.1. Precipitação Provável

Assim como no caso da evapotranspiração potencial, utilizou-se o valor de precipitação que tem 75 % de probabilidade de ocorrer. Este valor também é chamado de precipitação dependente, pois o seu valor, em mm, depende do nível de probabilidade desejado (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

Diversas metodologias foram apresentadas para a determinação da precipitação dependente ou provável, todas baseadas em séries históricas de dados (CHOW, 1964; LINSLEY *et alii*, 1975; THOM, 1958). Dentre essas metodologias, a de uso mais comum é a que foi proposta por Thom, em 1958, que faz uso da distribuição gama incompleta, que tem sido usada por pesquisadores como HARGREAVES (1973) e FRIZZONE (1979), dentre outros.

A probabilidade acumulada de ocorrência de um fenômeno associado à distribuição gama incompleta pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$\text{Prob}' = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^\lambda P^{\alpha-1} e^{-P/\beta} dP \quad \text{eq. 2.31}$$

em que:

Prob' - probabilidade de que P esteja entre 0 e o valor λ ;

P - valor genérico de precipitação;

λ - valor de precipitação que tem probabilidade acumulada Prob' de ocorrer;

- α - parâmetro de forma da distribuição gama;
 β - parâmetro de escala da distribuição gama;
 Γ - função gama;

A função de probabilidade gama incompleta é mostrada na
 Figura 6:

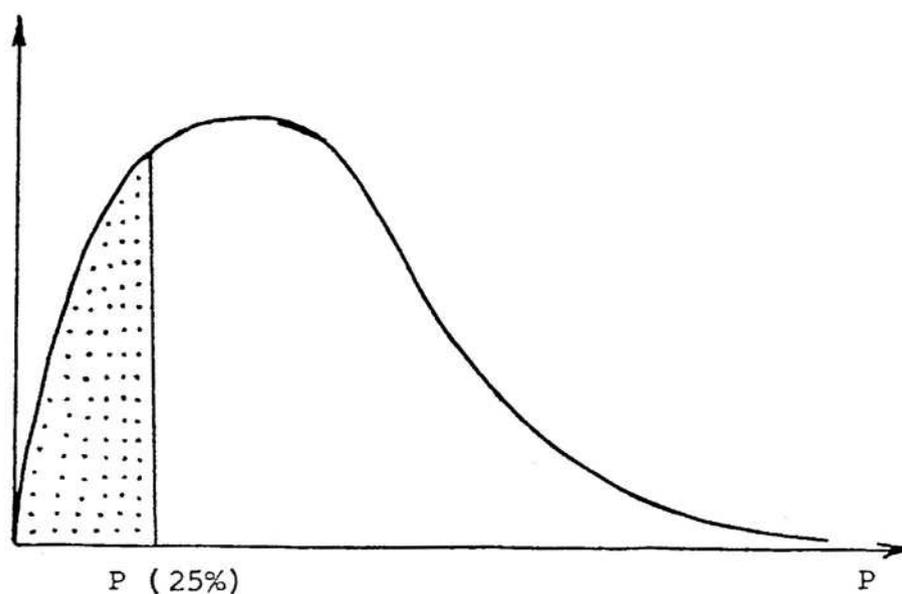


FIGURA 6 - Gráfico da Função de Probabilidade Gama Incompleta.

Os parâmetros α e β podem ser estimados por meio das seguintes expressões, devidas a THOM (1958):

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4 A} (1 + \sqrt{1 + 4A/3}), \quad \text{eq. 2.32}$$

em que:

$$A = \ln \bar{P} - \frac{\sum \ln P}{n1} \quad e \quad \text{eq. 2.33}$$

$$\hat{\beta} = \frac{P}{\hat{\alpha}}, \quad \text{eq. 2.34}$$

sendo:

n_1 - número de dados (maiores que zero) que compõem a série de precipitação pluvial.

A função gama pode ser determinada pela série assintótica de Stirling, conforme cita SPIEGEL (1973):

$$\Gamma(x+1) = \sqrt{2\pi x} \ x^x \ e^{-x} \left[1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{1}{51840x^3} + \dots \right] \quad \text{eq. 2.35}$$

No caso em que a série de dados de precipitação contiver um ou mais valores iguais a zero, uma função de distribuição mista, que englobaria as duas séries, de valores iguais a zero e diferentes de zero, poderia ser usada (THOM, 1966). Essa função mista é dada por:

$$\text{Prob} = Q_0 + Q_1 \cdot \text{Prob}', \quad \text{eq. 2.36}$$

em que:

Prob : probabilidade mista de ocorrência da precipitação P;

Q_0 : probabilidade de que P seja igual a zero;

Q_1 : probabilidade de que P seja maior do que zero;

Sendo n_0 o número de zeros numa série de precipitação, Q_0 e Q_1 podem ser calculados como se segue:

$$Q_0 = n_0 / (n_1 + n_0), \quad \text{eq. 2.37}$$

$$Q_1 = 1 - Q_0. \quad \text{eq. 2.38}$$

Fixou-se, assim, o nível Prob em 75% e calculou-se o valor limite λ de precipitação, em mm, que tem 75% de probabilidade acumulada de ocorrer.

O enfoque da precipitação, em relação à evapotranspiração, é diferente, apesar da preocupação básica (evitar déficit hídrico) ser a mesma. No caso da evapotranspiração, há 75 % de probabilidade de que evapotranspire um certo valor ou menos. Já no caso da precipitação, deve haver 75 % de probabilidade de que precipite um determinado valor ou mais. Os gráficos das Figuras 5 e 6 ilustram melhor estas afirmativas. Assim, como o valor Prob representa a probabilidade de que a precipitação ocorra na faixa de 0 a λ , utiliza-se o nível Prob = 25 %, o que significa 75 % de probabilidade de que a precipitação P supere o valor λ .

Para o cálculo dos níveis de probabilidade, foi utilizado o "software" Gamma, versão 2.2, que permite vários tipos de cálculos de probabilidade de fenômenos associados à distribuição gama incompleta.

O diagrama de blocos da parte do programa que foi utilizada está na Figura 7:

2.8.2. Dados Utilizados na Determinação da Precipitação Efetiva

Os dados utilizados neste item foram provenientes de estações pluviométricas que se situam dentro ou próximas da região em estudo, listadas no Quadro 13:

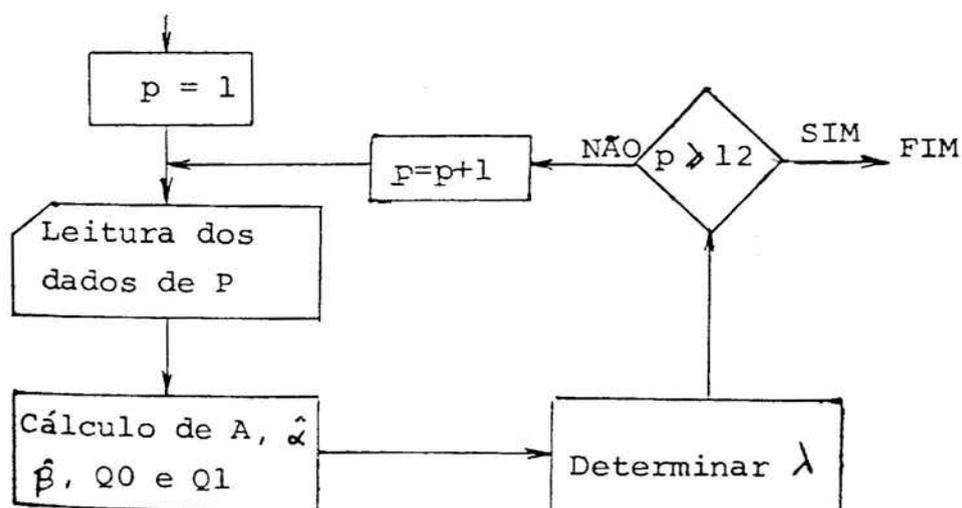


FIGURA 7 - Diagrama de Blocos da Metodologia Utilizada pelo Software Gamma para o Cálculo da Precipitação que Tem 25 % de Probabilidade de Ocorrer.

QUADRO 13 - Características das Estações Pluviométricas da Região em Estudo

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Alt.	Início	Fim	Tam.	Apr.
01643002	Burarama	Francisco Sá	16° 19' S	43° 43' W	573	1959	1978	18	Sim
01643003	Cana Brava	Francisco Sá	16° 19' S	43° 25' W	780	1964	1986	19	Sim
01643005	Francisco Sá	Francisco Sá	16° 29' S	43° 30' W	657	1951	1981	20	Sim
01643006	Faz. Pentaura	Montes Claros	16° 54' S	43° 54' W	900	1964	1986	17	Sim
01643007	Juramento	Juramento	16° 50' S	43° 36' W	670	1962	1986	20	Sim
01643008	Miralta(Morrinhos)	Montes Claros	16° 35' S	43° 57' W	850	1964	1986	19	Sim
01643009	Montes Claros (83437)	Montes Claros	16° 43' S	43° 52' W	646	1918	1978	5	Nao
01643010	Montes Claros	Montes Claros	16° 44' S	43° 52' W	655	1950	1976	21	Nao
01643011	Montes Claros	Montes Claros	16° 44' S	43° 52' W	655	1969	1978	9	Nao
01643013	Pires de Albuquerque	Bocaiúva	16° 56' S	43° 43' W	664	1964	1986	18	Sim
01643015	Santa Rosa de Lima	Montes Claros	16° 18' S	43° 57' W	650	1964	1986	18	Sim
01643016	Tamanduá	Francisco Sá	16° 35' S	43° 41' W	795	1963	1978	8	Nao
01643018	Montes Claros	Montes Claros	16° 44' S	43° 52' W	620	1941	1986	46	Sim
01643019	Ponte de Rodagem	Montes Claros	16° 46' S	43° 42' W	600	1969	1980	10	Sim
01643020	Capitão Enéas	Capitão Enéas	16° 19' S	43° 43' W	-	1975	1986	11	Nao
01643024	Juramento (83452)	Juramento	16° 47' S	43° 43' W	750	1985		0	Nao

Fonte: BRASIL (1987)

Das estações citadas, foram aproveitadas apenas aquelas cujo registro cobria a faixa de 10 anos ou mais e, no caso em que havia mais de uma estação num mesmo local, apenas a melhor série foi utilizada. Assim, foram aproveitadas apenas 10 estações, o que dá uma densidade de uma estação a cada 378 km². A última coluna do Quadro indica quais estações foram aproveitadas.

A localização das estações aproveitadas pode ser vista na Figura 8.

Apesar dos dados destas estações estarem disponíveis em formato diário, estes foram acumulados em meses, como descrito anteriormente, num total de 12 períodos durante o ano.

2.8.3. Dados de Precipitação Efetiva

Após o processamento do programa Gamma, foram obtidos os seguintes valores de precipitação dependente, associados a um nível de probabilidade acumulada de ocorrência de 25 % (Quadro 14).

Para melhor visualização dos resultados do Quadro 14, traçaram-se as isoietas no mapa da região em estudo, elaborando-se assim um mapa probabilístico de isoietas. Cada um desses mapas deve representar as isoietas com um nível de probabilidade de ocorrência para um período do ano. A título de ilustração, a Figura 8 representa um mapa para o primeiro mês do ano, onde as isoietas representam um valor de precipitação que tem 75 % de probabilidade de ser igualado ou superado. Para a continuidade do trabalho, não foi necessária

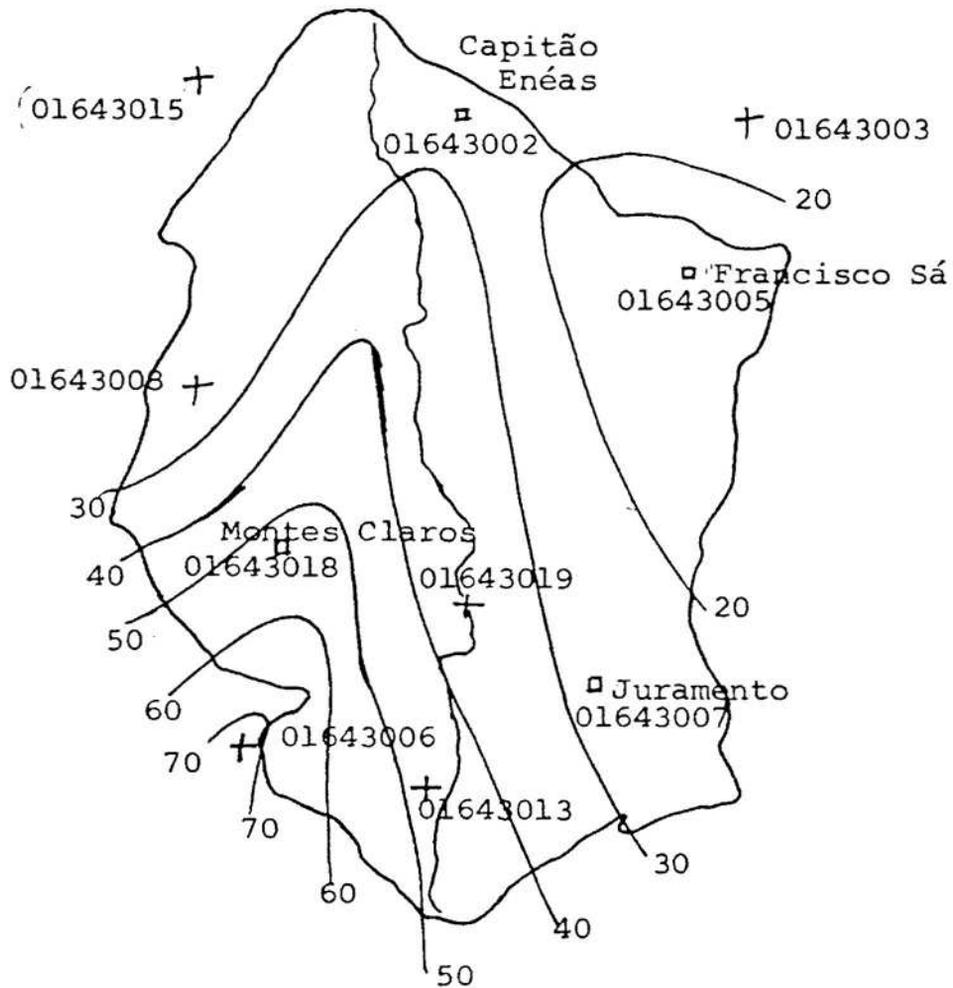


FIGURA 8 - Mapa de Isoietas (75 % de Probabilidade) da Região em Estudo, para o Primeiro Mês do Ano e Localização das Estações Pluviométricas.

QUADRO 14 - Precipitação que Tem 75 % de Probabilidade de Ser Igualada ou Superada, por Estação, para os 12 Períodos do Ano

Estações	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
01643002	27,0	2,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,5	78,4	21,5
01643003	26,1	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,0	96,5	54,0
01643005	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	84,5	59,0
01643006	71,5	10,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	119,5	56,5
01643007	27,0	20,5	11,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	104,0	62,0
01643008	19,5	24,5	6,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,5	63,5
01643013	47,5	22,5	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	97,0	118,5
01643015	29,5	6,0	13,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	72,5	64,0
01643018	53,0	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	29,5	64,5
01643019	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0	77,5	49,0

a confecção dos mapas, visto que todos os cálculos, inclusive interpolações, foram realizados pelo modelo computacional.

2.8.4. Interpolação

Em face da grande variabilidade da precipitação numa região, é importante estimar-se o total de precipitação em cada ponto da mesma, no nível de probabilidade desejado, principalmente para o cálculo das vazões dos cursos d'água. Desenvolveu-se, então, uma função escrita em linguagem computacional, que forneceu a precipitação, com uma certa probabilidade acumulada de ocorrência, em função da latitude e da longitude do local. Esta função, que recebeu o nome de "InterPrec", foi escrita em linguagem Turbo-Pascal, versão 5.5. O método de interpolação utilizado foi o método aritmético clássico, citado por LINSLEY *et alii* (1975), VILLELA e MATTOS (1975) e CHOW (1964).

A definição geográfica da função está limitada a 36 segundos de arco, tanto no sentido dos paralelos como no dos meridianos, o que é suficiente para qualquer aplicação (basta verificar que, no equador, $36'' = 1,08 \text{ km}$).

A listagem completa desta função é apresentada no Apêndice B.

2.9. Cursos d'Água da Área em Estudo

Para o presente trabalho, foram considerados somente os cursos d'água cuja água estava sendo usada para irrigação. A relação completa dos irrigantes na área em estudo, sua localização na bacia, a área irrigada e o sistema de irrigação utilizado podem ser vistos no Apêndice C.

O mapa da região com apenas os cursos d'água de interesse está na Figura 9.

2.9.1. Representação da Bacia Hidrográfica em Estrutura de Dados Tratável por Computador

WIRTH (1976) definiu um programa de computador pela expressão "Algoritmos + Estruturas de Dados = Programas". A estrutura de dados mais adequada para representar uma bacia hidrográfica é a árvore binária, que pode ser definida como um conjunto finito de um ou mais nodos e que consiste de uma raiz e de árvores binárias separadas, denominadas subárvore esquerda e subárvore direita (HOROWITZ e SAHNI, 1986).

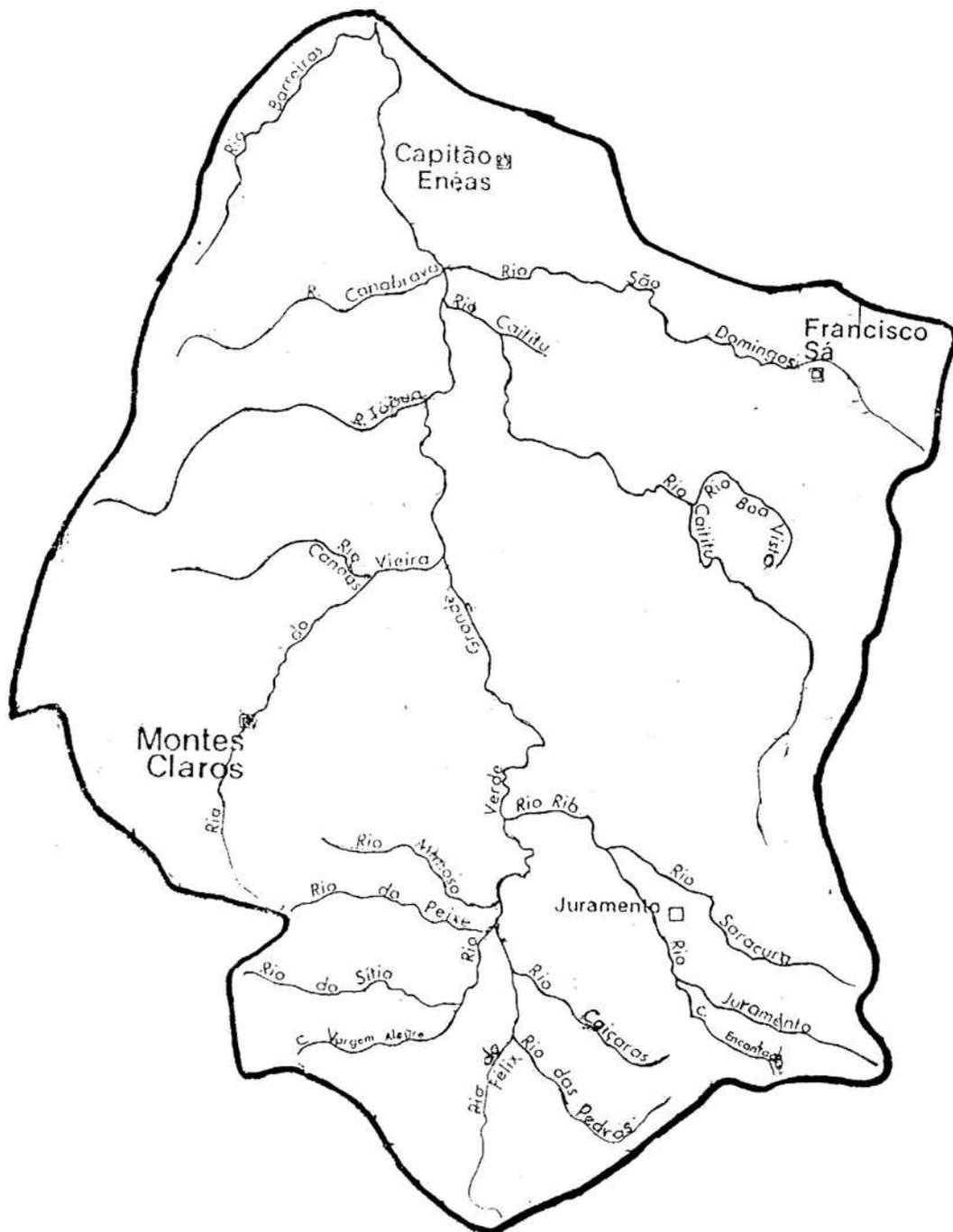


FIGURA 9 - Cursos d'Água Utilizados na Simulação.

Neste trabalho, cada nodo é um trecho de curso d'água entre dois afluentes e, subindo o rio, cada confluência determina a criação de mais duas subárvores, uma correspondente ao novo trecho do rio anterior e a outra correspondente ao afluente. Os nodos terminais, ou folhas, são os trechos de curso d'água que começam em sua nascente. A Figura 10 mostra a representação da bacia hidrográfica sob a forma da árvore binária, e deve ser associada com o mapa da Figura 9.

O caminhamento desta árvore, para a totalização das vazões, tem de ser feito no sentido das folhas para a raiz (de montante para jusante), sendo necessário o conhecimento da vazão das duas subárvores (afluentes) para se conhecer a vazão da raiz. Esses fatores levaram à escolha do caminhamento pós-ordem para esta árvore, onde se percorre a subárvore esquerda em seguida a subárvore direita e por último é feito o acesso à raiz.

O algoritmo recursivo de caminhamento pós-ordem clássico é apresentado por HOROWITZ e SAHNI (1986) e VELOSO *et alii* (1986).

2.9.2. Codificação dos Cursos d'Água

Com o objetivo de se individualizar cada trecho de curso d'água, estabeleceu-se uma codificação apropriada à organização dos dados em árvore binária.

Começando pela raiz da árvore, que recebe o código "0", cada nova subárvore tem acrescentado em seu código o algarismo

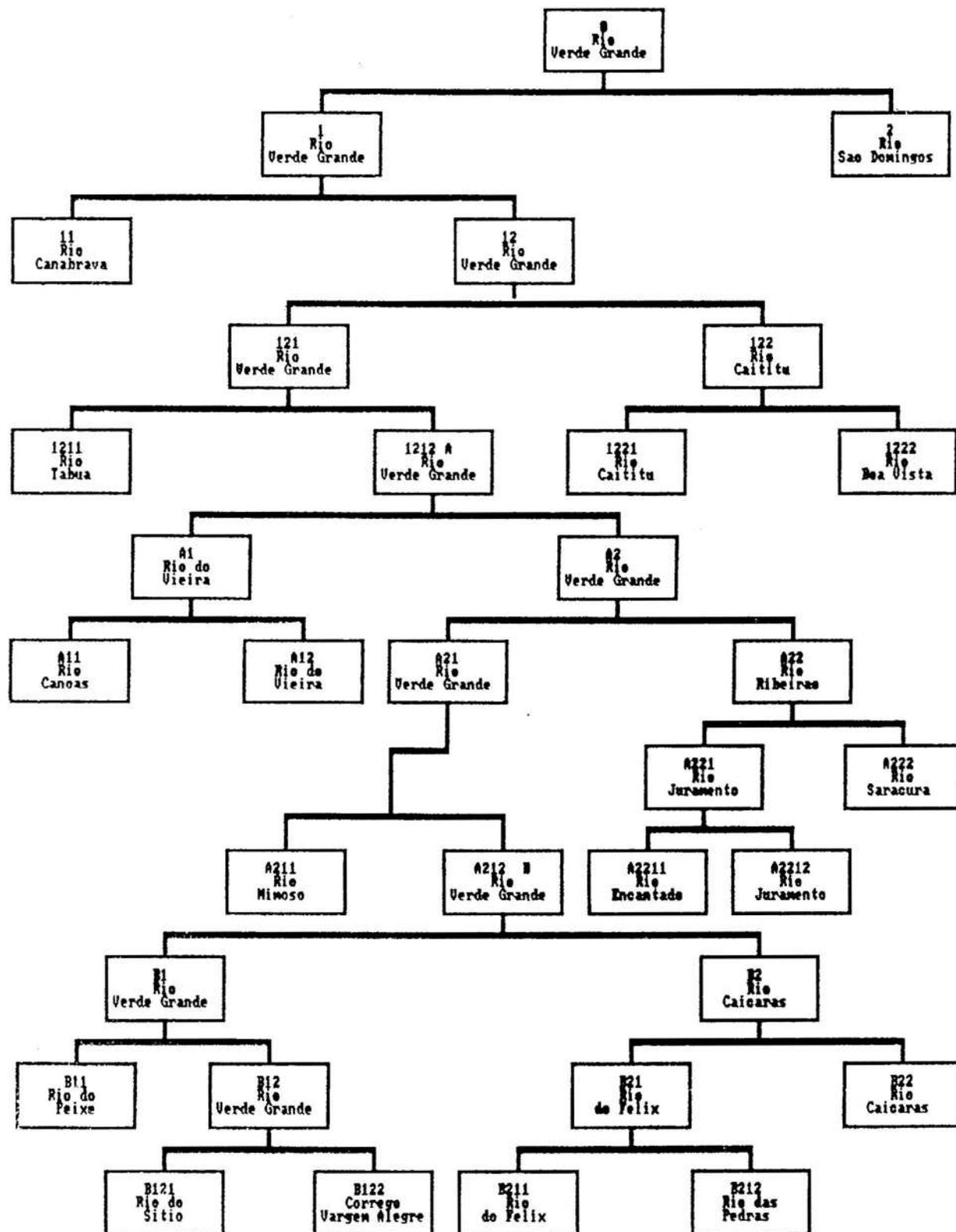


FIGURA 10 - Representação da Bacia Hidrográfica em Estudo sob a Forma de Árvore Binária.

"1", se for uma subárvore esquerda, ou "2", caso seja uma subárvore direita.

Obviamente, a cada nível de profundidade que se desce na árvore, esse código tende a aumentar em tamanho, sendo seu comprimento igual à altura da árvore. Isso faz com que, quando o código atinje um comprimento tal (quatro ou cinco caracteres), seja, então, substituído por um único caractere, uma letra, por exemplo. No caso desta árvore, o código "1212" foi substituído pelo código "A", e o código "A212" por "B".

A principal vantagem desse método de codificação é que, a partir do código, identifica-se imediatamente a posição do nodo na árvore.

2.9.3. Vazão dos Cursos d'Água

A vazão de um curso d'água é constituída por dois componentes principais: a vazão residual, que é constantemente alimentada pelo lençol freático, e a pluvial que é devida à precipitação instantânea. Seja um curso d'água qualquer, como representado na Figura 11.

A vazão do curso d'água na abscissa x é dada por:

$$Q_{rpx} = QI_{rp} + q_{rpx} + \Omega_{rpx} \quad \text{eq. 2.39}$$

$$QI_{1p} = QF_{2p} + QF_{3p} \quad \text{eq. 2.40}$$

$$q_{rpx} = k_{rp} \cdot x \quad \text{eq. 2.41}$$

$$\Omega_{rpx} = K_{rp} \cdot x \quad \text{eq. 2.42}$$

em que:

Q_{rpx} - vazão do curso d'água r na abscissa x de seu comprimento total L_r ;

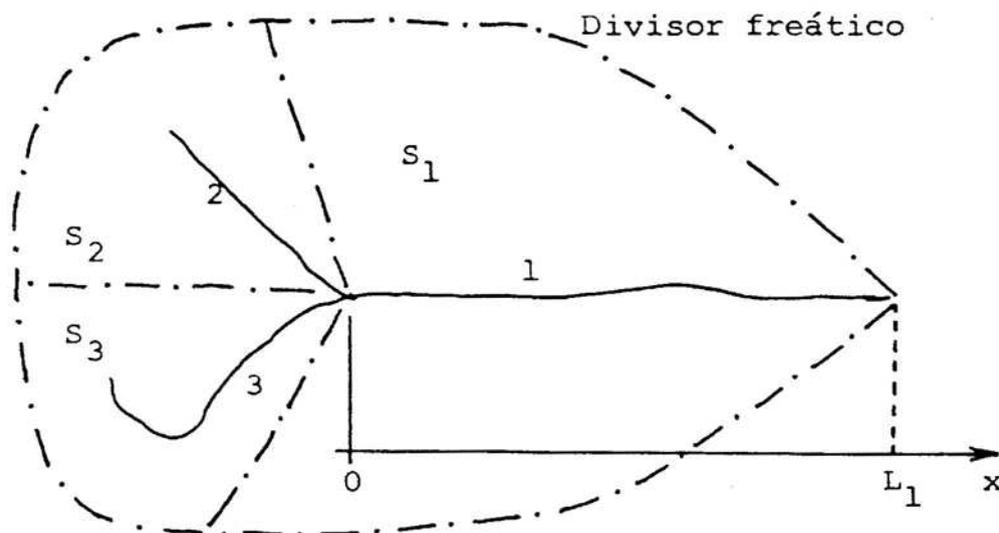


FIGURA 11 - Curso d'Água Hipotético.

QI_{rp} - vazão inicial do curso d'água r ($r = 1$ na Figura 11);

QF_{rp} - vazão final dos cursos d'água anteriores ($r = 2$ ou $r = 3$ na Figura 11);

q_{rpx} - vazão de base devida à contribuição do lençol freático;

Ω_{rpx} - vazão devida à precipitação instantânea;

x - abscissa do curso d'água dentro de seu trecho;

k_{rp} - coeficiente que relaciona o comprimento do trecho do curso d'água r , com a sua vazão devida ao lençol freático, no período p , em $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

K_{rp} - idem, vazão devida à precipitação instantânea;

$$k_{rp} = \frac{S_r}{S_t} \frac{q_{tp}}{L_r} \quad \text{eq. 2.43}$$

$$K_{rp} = \frac{C}{L_r} \oint_r P \cdot dA \quad \text{eq. 2.44}$$

em que:

S_r - área da sub-bacia r ;

S_t - área de drenagem da estação fluviométrica (km^2);

q_{tp} - vazão residual medida na estação fluviométrica no período p ;

C - coeficiente de "run-off";

dA - diferencial de área;

A integral acima é efetuada na região de drenagem de cada sub-bacia r .

Obviamente, se $x = L$, tem-se que $Q_{rpL} = QF_{pr}$.

No Quadro 15 encontram-se as características das sub-bacias utilizadas neste trabalho.

Os coeficientes k_{rp} e K_{rp} variam de acordo com a sub-bacia e com o período do ano; seus valores estão listados no Apêndice D.

2.10. Outros Parâmetros do Modelo

2.10.1. Coeficiente de "run-off"

É a razão entre o volume de água que escorre sob a forma de escoamento superficial ("run-off") e o volume precipitado sobre uma superfície horizontal. Depende de inúmeros fatores, como declividade, textura e estrutura do solo, intensidade da precipitação, presença e tipo de vegetação, teor de umidade do solo, rugosidade da superfície, teor de matéria orgânica no solo, presença de estruturas conservacionistas etc. Neste trabalho, na falta de dados de

QUADRO 15 - Características das Sub-bacias Hidrográficas na Região em Estudo

Código	Nome do Curso d'água	Trecho	Área (km ²)	Comprim. (km)	N.º de irrig.
0	rio Verde Grande	entre o rio Barreiras e o rio São Domingos	336,20	19,95	6
1	rio Verde Grande	entre o rio São Domingos e o rio Canabrava	0,61	0,35	0
11	rio Canabrava		147,18	23,45	6
12	rio Verde Grande	entre o rio Canabrava e o rio Caititu	5,14	2,45	0
121	rio Verde Grande	entre o rio Caititu e o rio Tábua	33,50	9,10	3
1211	rio Tábua		185,43	28,35	6
1212=A	rio Verde Grande	entre o rio Tábua e o rio do Vieira	138,00	12,95	0
A1	rio do Vieira	entre o rio canoas e o rio Verde Grande	18,68	5,95	0
A11	rio das Canoas		97,04	17,50	1
A12	rio do Vieira	até o rio Canoas	430,22	28,35	4
A2	rio Verde Grande	entre o rio Vieira e o rio Ribeirão	408,11	24,50	6
A21	rio Verde Grande	entre o rio Ribeirão e o rio Mimoso	52,25	8,75	1
A211	rio Mimoso		50,53	13,65	3
A212=B	rio Verde Grande	entre o rio Mimoso e o rio Caiçaras	1,10	2,10	0
B1	rio Verde Grande	entre o rio Caiçaras e o rio do Peixe	0,49	0,70	0
B11	rio do Peixe		57,33	15,40	1
B12	rio Verde Grande	entre o rio do Peixe e o rio do Sítio	19,66	5,60	5
B121	rio do Sítio		108,53	15,40	6
B122	rio Vargem Alegre		92,30	9,10	2
B2	rio Caiçaras		38,34	3,50	0
B21	rio do Félix	entre o rio das Pedras e o rio Caiçaras	14,45	5,25	0
B211	rio do Félix	até o rio das Pedras	76,81	14,70	1
B212	rio das Pedras		71,85	12,60	6
B22	rio Caiçaras	até o rio do Félix	75,70	12,60	4
A22	rio Ribeirão	entre o rio Verde Grande e o rio Saracura	85,26	9,45	6
A221	rio Juramento	entre o rio Saracura e o Córrego Encantado	44,28	10,05	3
A2211	córrego Encantado		31,11	11,20	2
A2212	rio Juramento	até o Córrego Encantado	57,02	15,40	0
A222	rio Saracura		123,54	21,35	1
122	rio Caititu	entre o rio Verde Grande e o rio Boa Vista	281,14	27,65	6
1221	rio Caititu	até o rio Boa Vista	200,41	31,85	4
1222	rio Boa Vista		107,55	13,30	3
2	rio São Domingos		390,68	40,25	6
Total			3782,49		92

campo mais concretos, será utilizado, para todas as sub-bacias em estudo, o valor de 0,20 para o coeficiente de "run-off".

2.10.2. Eficiência dos Sistemas de Irrigação

É a razão entre o volume de água colocado à disposição da planta irrigada e o volume retirado da fonte de água. Foram considerados os seguintes valores de eficiência, conforme o Quadro 16.

QUADRO 16 - Eficiência dos Diversos Sistemas de Irrigação

Sistema	Eficiência (%)
Inundação	30
Superfície (Sulcos)	50
Autopropelido	60
Aspersão Convencional	70
Pivô Central	80

Fonte: BERNARDO (1989), SÁ (1990)

2.11. Simulação do Consumo de Água pelas Culturas

2.11.1. Definição de Célula

Numa propriedade (extensão de terra pertencente a apenas um proprietário) irrigada pode-se ter culturas, solos e sistemas de irrigação diferentes, dentre outros, o que causa modificações na quantidade de água a ser utilizada.

Para atender às necessidades do presente trabalho, o conceito de propriedade será substituído pelo conceito de célula: uma célula é uma extensão de terra totalmente cultivada e irrigada, que satisfaça as seguintes condições:

- (a) em cada célula deverá ser cultivada apenas uma cultura, que será plantada na mesma época;
- (b) cada célula terá um mesmo tipo de solo, no que se refere à água disponível por unidade de profundidade de solo;
- (c) cada célula será irrigada por um mesmo tipo de sistema de irrigação ou por sistemas diferentes que tenham a mesma eficiência de irrigação.

Para cada célula é essencial que se tenha as seguintes informações:

- (a) área irrigada;
- (b) prioridade para ser atendida no fornecimento de água;
- (c) cultura cultivada;
- (d) características de retenção de água no seu solo;
- (e) sistema de irrigação utilizado;
- (f) curso d'água em que a célula está localizada e a sua posição (abscissa) no mesmo.

Neste trabalho, considerou-se que a prioridade para atendimento no fornecimento de água está relacionada com a posição da célula dentro do curso d'água, ou seja, quanto mais à montante estiver posicionada a célula, maior será a sua prioridade.

2.11.2. Determinação do Consumo de Água em Cada Célula

A vazão por célula no período p é dada por:

$$V_{cp} = \frac{10 (NH_{up} - P_p - ARM_{cup}) A_c}{86400 \epsilon_c} \quad \text{eq. 2.45}$$

em que:

V_{cp} : vazão necessária para irrigar a célula c , no período p , em $m^3 \cdot s^{-1}$;

NH_{up} : necessidade hídrica da cultura u , durante o período p , em mm;

P_p : precipitação, durante o período p , em mm;

ARM_{cup} : armazenamento de água no solo da célula c , no espaço ocupado pelas raízes da cultura u , durante o período p , em mm;

ϵ_c : eficiência do sistema que irriga a célula c , em decimal;

A_c : área da célula em ha.

As necessidades hídricas podem ser calculadas por meio da seguinte equação (FRÈRE e POPOV, 1986):

$$NH_{up} = KC_{uie} \times ETP_p, \quad \text{eq. 2.46}$$

em que:

KC_{uie} : coeficiente da cultura u no i -ésimo período de seu ciclo, iniciado na época de plantio e (adimensional);

ETP_p : evapotranspiração potencial, durante o período p , em mm;

O i -ésimo período da cultura, ou o número de ordem de determinado período dentro do ciclo da cultura, pode ser calculado por:

$$i = p - e + 1 \quad \text{eq. 2.47}$$

O armazenamento de água no solo da célula c expressa a quantidade de água que se encontra na faixa de solo ocupada pelo sistema radicular da cultura u no período p e é calculado recursivamente (FRÈRE e POPOV, 1986), isto é:

$$ARM_{cup} = P_p - NH_{up} + ARM_{cu(p-1)} + \frac{V_{cp}}{A_c} \quad \text{eq. 2.48}$$

ARM_{cue} é a quantidade de água armazenada no solo da célula c na época de plantio da cultura u . ARM_{cue} será considerado igual a zero, na falta de um valor mais exato.

ARM_{cup} máximo, ou capacidade de retenção hídrica, corresponde à quantidade de água que existe entre a capacidade de campo e o ponto de murchamento do solo da célula c , multiplicado pela profundidade útil do perfil do solo aproveitado pelas raízes da cultura u no período i de seu ciclo. Será denotada por CRH_{cui} e será calculada por meio da equação a seguir, de acordo com FRÈRE e POPOV (1986):

$$CRH_{cui} = PSR_{ui} \cdot DRA_c, \quad \text{eq. 2.49}$$

em que:

PSR_{ui} : profundidade do sistema radicular da cultura u no período i dentro de seu ciclo, em cm;

DRA_c : disponibilidade real de água do solo da célula c , em mm de água por cm de solo.

Calcula-se o armazenamento pela eq. 2.48 e, então, faz-se o seguinte teste (FRÈRE e POPOV, 1986):

Se ARM_{cup} for maior que $CRH_{cu(p-e+1)}$ então considerar-se-á

$$ARM_{cup} = CRH_{cu(p-e+1)} \quad \text{eq. 2.50}$$

2.11.3. Determinação das Melhores Combinações de Época de Plantio

A vazão em cada curso d'água, independente do consumo para irrigação, é determinada pela equação 2.39. A cada célula presente no curso d'água, abate-se o valor da vazão V_{cp} da vazão total do curso d'água Q_{rpx} .

Para se determinar a combinação de épocas de plantio que levam a um menor consumo de água de irrigação, é necessário calcular todas as combinações possíveis de plantio entre as células irrigadas e, posteriormente, selecionar a combinação que leve a um menor consumo de água para fins de irrigação ou, em outras palavras, maior vazão no curso d'água. O fluxograma para este cálculo é apresentado na Figura 12.

Após a determinação das melhores combinações em um curso d'água, prossegue-se no cálculo para o restante dos cursos até a determinação da vazão para todos da bacia. O algoritmo para este tipo de cálculo é o mesmo para o caminhamento da árvore binária, com pequenas modificações (Apêndice B). O tempo de processamento para o cálculo completo foi de 11,7 horas (Apêndice E).

2.11.4. Programa de Simulação

Todos os programas de computador citados até o momento foram escritos apenas com o objetivo de colocar os dados numa forma adequada para o uso do programa de simulação. Este também foi escrito em linguagem Pascal, tendo sido utilizada a

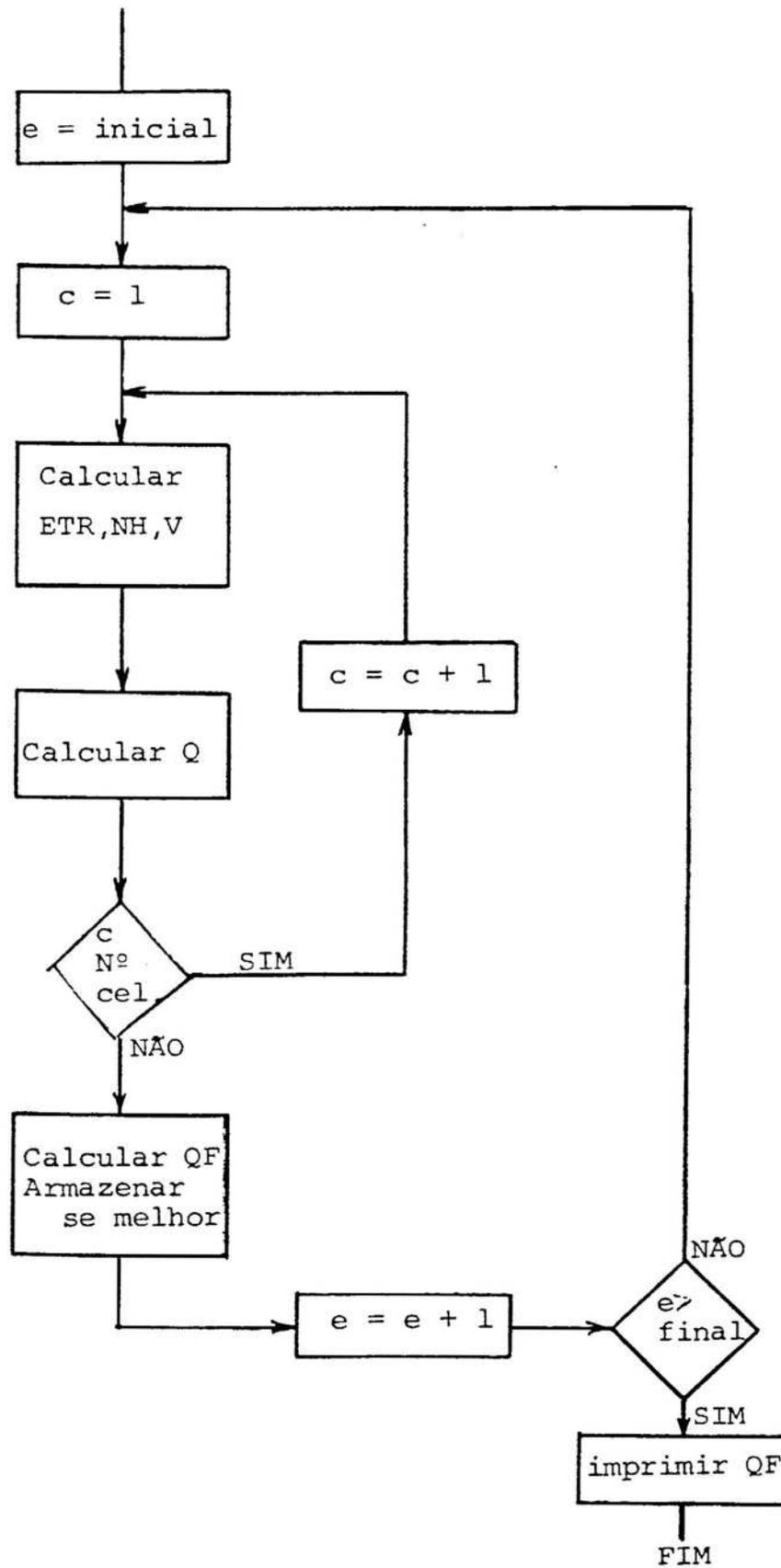


FIGURA 12 - Fluxograma do Programa de Simulação.

mesma classe de computadores, compilador e sistema operacional. O tempo de processamento é muito elevado para microcomputadores do tipo IBM-PC, mas essa classe de computadores foi preferida em relação aos computadores de grande porte ("mainframes"), que teriam a vantagem de um menor tempo de processamento pelas seguintes razões:

(a) Difusão - o programa, se desenvolvido para essa faixa de computadores, poderá ter o seu uso muito mais difundido do que se tivesse sido escrito para ser executado em "mainframes";

(b) Adaptabilidade ao usuário - o programa é totalmente configurável por meio de seus arquivos de dados, e o tempo de processamento vai depender dessa configuração. Um usuário que disponha de um microcomputador PC simples pode usar dados de entrada que lhe darão os resultados em poucos minutos, porém sem muita precisão. O usuário que dispuser de um AT 486 pode utilizar o mesmo programa configurado de maneira mais detalhada, e terá um resultado mais preciso;

(c) Portabilidade - como o Pascal é uma linguagem altamente portátil entre os diversos tipos de computadores, é possível adaptar rapidamente este programa para ser processado em outras classes de computadores (minis, "mainframes" etc.), ganhando com isso precisão dos resultados, porém a um custo mais elevado de processamento.

Para o desenvolvimento do programa de simulação, foi utilizada uma metodologia que permitisse ao máximo a compreensão da lógica do programa pelos futuros usuários que se disponham a alterá-lo. Essa metodologia consistiu na divisão do programa num grande número de sub-rotinas

(procedimentos e funções) específicas, além de um uso elevado de documentação do código fonte. Essa metodologia teve a vantagem adicional de agilizar o desenvolvimento e a depuração do programa.

O programa utiliza oito arquivos de entrada diferentes, que contêm dados que alimentam a simulação, e três arquivos de saída, onde são gravados os resultados. A descrição desses arquivos é apresentada no Apêndice A.

O código fonte completo do programa de simulação está no Apêndice B, na listagem dos arquivos "simula.pas", "simula.prc" e "interpre.pas".

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resultados

Após o processamento do programa de simulação com a configuração determinada pelos arquivos de dados constantes no Apêndice A, foram obtidos os resultados, que estão sintetizados nos Quadros 17, 18 e 19. Os dois primeiros Quadros mostram apenas as vazões provenientes da melhor combinação de épocas de plantio em cada trecho. As vazões das demais combinações não são informadas pelo programa, como uma maneira de minimizar o volume de resultados a ser analisado.

O Quadro 17 mostra as vazões finais de cada curso d'água, o Quadro 18 mostra as vazões obtidas como consumo de cada célula individualmente, e o Quadro 19 mostra as épocas de plantio que foram consideradas para o cálculo das vazões mostradas nos dois quadros anteriores.

Esses resultados podem ser visualizados também no gráfico da Figura 13, que é um gráfico Vazão x Abscissa do rio Verde Grande, tomado pelo seu caminho mais longo.

QUADRO 17 - Vazões dos Cursos d'Água da Bacia do Rio Verde Grande, Calculadas Pelo Programa de Simulação, Para a Melhor Combinação das Épocas de Plantio das Células Contidas Naquele Curso d'Água, por Período do Ano

Código	Vazões (m ³ /s)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	63,390	62,552	56,589	54,125	50,669	51,758	51,058	47,788	47,696	52,630	64,417	74,328
1	51,733	50,680	45,732	43,724	40,934	41,832	41,284	38,672	38,600	42,988	53,968	60,986
11	2,617	2,477	2,207	2,106	1,973	2,008	1,976	1,839	1,833	2,187	3,060	3,162
12	49,107	48,193	43,515	41,609	38,953	39,815	39,299	36,825	36,759	40,793	50,900	57,812
121	39,089	38,350	34,623	33,106	30,991	31,670	31,253	29,273	29,214	32,459	40,563	46,029
1211	3,301	3,121	2,781	2,653	2,485	2,541	2,510	2,355	2,353	2,762	3,870	3,992
1212=A	35,188	34,663	31,340	29,973	28,057	28,677	28,302	26,516	26,468	29,210	35,981	41,310
A1	8,884	8,977	8,188	7,841	7,340	7,516	7,430	6,986	6,982	7,362	8,233	10,232
A11	1,762	1,667	1,485	1,417	1,328	1,358	1,342	1,260	1,259	1,476	2,064	2,130
A12	6,794	6,997	6,423	6,156	5,762	5,902	5,834	5,486	5,484	5,612	5,796	7,707
A2	23,851	23,364	21,083	20,157	18,867	19,265	18,996	17,763	17,718	19,794	24,881	28,115
A21	11,458	11,019	9,878	9,435	8,829	9,020	8,897	8,326	8,312	9,543	12,728	13,688
A211	0,888	0,847	0,757	0,723	0,677	0,692	0,684	0,641	0,640	0,740	1,011	1,066
A212=B	9,643	9,294	8,337	7,964	7,451	7,612	7,506	7,023	7,011	8,027	10,640	11,503
B1	4,761	4,630	4,167	3,982	3,722	3,796	3,736	3,481	3,472	3,948	5,094	5,642
B11	1,012	0,962	0,859	0,820	0,767	0,785	0,775	0,728	0,727	0,842	1,163	1,218
B12	3,739	3,659	3,300	3,155	2,949	3,004	2,954	2,746	2,738	3,098	3,916	4,411
B121	1,934	1,827	1,628	1,553	1,452	1,478	1,453	1,350	1,345	1,611	2,270	2,338
B122	1,464	1,503	1,378	1,321	1,236	1,265	1,250	1,174	1,174	1,209	1,268	1,665
B2	4,865	4,646	4,154	3,966	3,714	3,801	3,756	3,528	3,525	4,064	5,531	5,842
B21	2,888	2,741	2,445	2,334	2,186	2,236	2,210	2,075	2,074	2,416	3,344	3,481
B211	1,357	1,290	1,151	1,099	1,030	1,055	1,044	0,983	0,983	1,136	1,564	1,634
B212	1,276	1,209	1,077	1,028	0,963	0,983	0,970	0,907	0,906	1,067	1,489	1,541
B22	1,344	1,273	1,135	1,083	1,014	1,037	1,025	0,961	0,960	1,122	1,567	1,623
A22	5,948	5,708	5,112	4,883	4,568	4,651	4,575	4,253	4,228	4,918	6,654	7,116
A221	2,346	2,226	1,985	1,895	1,773	1,800	1,767	1,634	1,621	1,942	2,722	2,830
A2211	0,553	0,523	0,466	0,445	0,415	0,424	0,418	0,390	0,389	0,458	0,645	0,667
A2212	1,016	0,960	0,855	0,816	0,764	0,783	0,775	0,730	0,730	0,851	1,194	1,229
A222	2,204	2,081	1,853	1,768	1,654	1,694	1,674	1,573	1,572	1,839	2,594	2,667
122	9,922	9,756	8,815	8,430	7,893	8,075	7,976	7,487	7,479	8,254	10,215	11,665
1221	3,258	3,286	2,995	2,868	2,684	2,744	2,708	2,538	2,535	2,698	3,044	3,758
1222	1,913	1,810	1,613	1,539	1,442	1,476	1,460	1,374	1,373	1,600	2,239	2,312
2	6,170	6,354	5,832	5,590	5,234	5,356	5,291	4,969	4,965	5,100	5,264	6,999

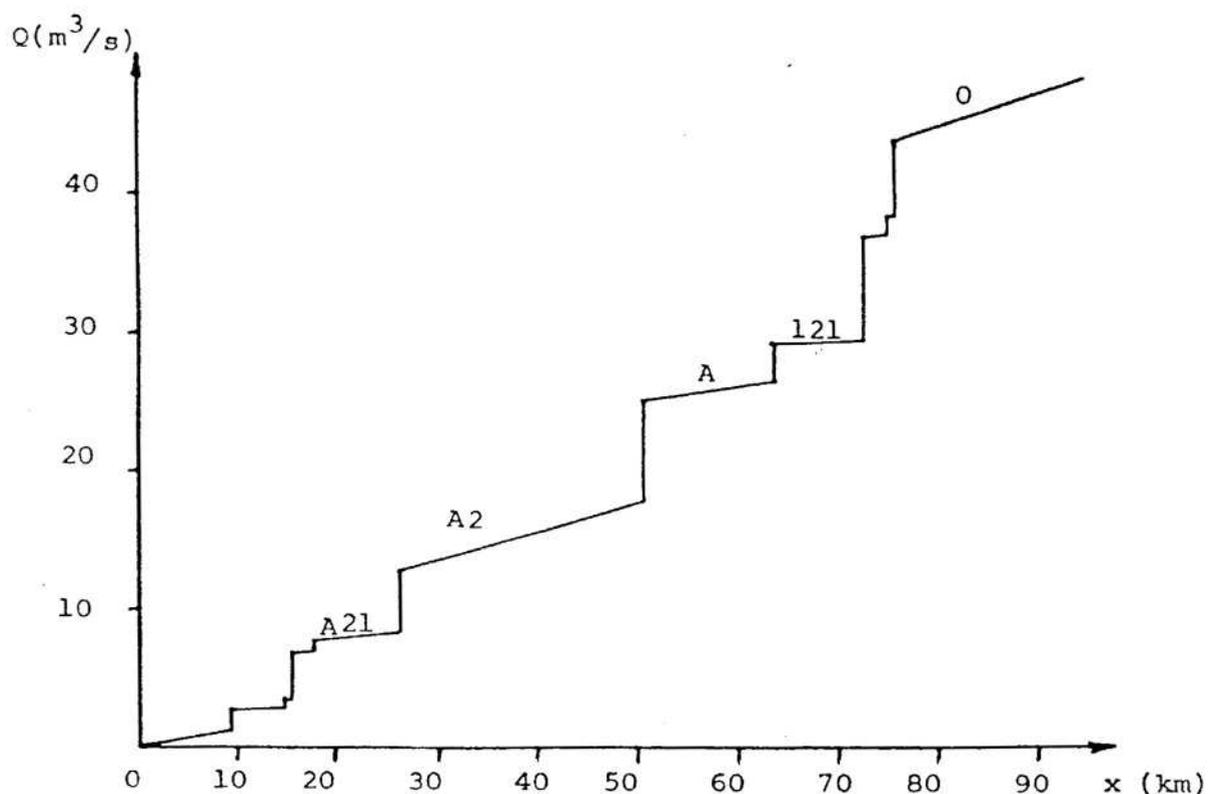


FIGURA 13 - Vazão do Rio Verde Grande em Função da Sua Abscissa, em Seu Trecho de Maior Comprimento, para o Mês de Setembro.

QUADRO 18 - Vazão Simulada para Algumas Células da Área em Estudo

Rio	Cód.	Área Propr.	Sistema Irrig.	Cultura	Vazão (l/s)											
					Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	0-1	98,0	Pivô	Feijão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,06	25,63	48,05	52,84	0,00	0,00	0,00
0	0-0	43,0	Pivô	Algodão	0,00	0,00	0,00	0,00	5,84	9,02	14,88	23,91	26,85	16,96	0,00	0,00
11	11-2	20,0	Inund.	Feijão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,65	13,95	26,15	28,76	0,00	0,00	0,00
A2	A2-2	20,0	Autop.	Feijão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,83	6,97	13,07	14,38	0,00	0,00	0,00
121	121-0	20,0	Sup.	Milho	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,47	8,00	15,37	20,89	10,86	0,00	0,00
A12	A12-1	18,0	Autop.	Algodão	0,00	0,00	0,00	0,00	3,26	5,03	8,31	13,34	14,98	9,47	0,00	0,00
A22	A22-0	18,0	Inund.	Milho	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,71	12,00	23,05	31,33	16,29	0,00	0,00
121	121-2	12,0	Conv.	Feijão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97	3,59	6,72	7,40	0,00	0,00	0,00
11	11-3	10,0	Conv.	Milho	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	2,86	5,49	7,46	3,88	0,00	0,00
121	121-1	10,0	Conv.	Milho	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	2,86	5,49	7,46	3,88	0,00	0,00
A12	A12-2	7,0	Sup.	Algodão	0,00	0,00	0,00	0,00	1,52	2,35	3,88	6,23	6,99	4,42	0,00	0,00
A12	A12-0	4,5	Conv.	Feijão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	1,34	2,52	2,77	0,00	0,00	0,00

QUADRO 19 - Épocas de Plantio que Levam a Um Menor Consumo de Água para Fins de Irrigação

Código	Nome do Rio	Cel.1	Cel.2	Cel.3	Cel.4	Cel.5	Cel.6
0	rio Verde Grande	Mai	Jun	Jun	Jun	Jun	Jun
1	rio Verde Grande						
11	rio Canabrava	Jun	Jun	Jun	Jun	Jun	Jun
12	rio Verde Grande						
121	rio Verde Grande	Jun	Jun	Jun			
1211	rio Tábua	Jun	Jun	Mai	Jun	Jun	Jun
1212=A	rio Verde Grande						
A1	rio do Vieira						
A11	rio das Canoas	Jun					
A12	rio do Vieira	Jun	Mai	Mai	Jun		
A2	rio Verde Grande	Jun	Jun	Jun	Jun	Jun	Jun
A21	rio Verde Grande	Jun					
A211	rio Mimoso	Jun	Jun	Jun			
A212=B	rio Verde Grande						
B1	rio Verde Grande						
B11	rio do Peixe	Mai					
B12	rio Verde Grande	Jun	Jun	Jun	Mai	Jun	
B121	rio do Sítio	Jun	Jun	Mai	Mai	Jun	Jun
B122	rio Vargem Alegre	Jun	Mai				
B2	rio Caiçaras						
B21	rio do Félix						
B211	rio do Félix	Jun					
B212	rio das Pedras	Jun	Jun	Jun	Mai	Jun	Jun
B22	rio Caiçaras	Jun	Mai	Jun	Jun		
A22	rio Ribeirão	Jun	Jun	Jun	Jun	Mai	Mai
A221	rio Juramento	Jun	Jun	Jun			
A2211	córrego Encantado	Jun	Mai				
A2212	rio Juramento						
A222	rio Saracura	Mai					
122	rio Caititu	Jun	Mai	Jun	Jun	Jun	Jun
1221	rio Caititu	Mai	Jun	Jun	Jun		
1222	rio Boa Vista	Jun	Jun	Jun			
2	rio São Domingos	Mai	Mai	Jun	Jun	Mai	Jun

Analisando-se este gráfico, pode-se tirar várias informações:

- (a) a ordenada da linha de vazão indica a vazão na abscissa correspondente;
- (b) uma linha de vazão vertical ascendente marca a confluência de dois cursos d'água, e o comprimento da linha vertical representa a vazão que o afluente desagua no rio principal;
- (c) a declividade da linha de vazão, quando diferente de infinito, é sempre positiva e representa o acréscimo de vazão que é adicionada ao rio por quilômetro de seu leito.

Pode-se observar no Quadro 17 e na Figura 13 que, nos trechos mais a jusante da bacia, a vazão do rio Verde Grande assume valores muito elevados, superiores aos normais. Isso pode ser explicado pela maneira utilizada para o cálculo da vazão de base (equações 2.41 e 2.43), pois os coeficientes obtidos com base nos dados da estação fluviométrica 44600000, com área de captação de 420 km^2 , foram extrapolados para o restante da bacia, que tem 3780 km^2 de área. Essa extrapolação, com certeza, introduziu erros no cálculo da vazão dos cursos d'água, mas não havia outra estação fluviométrica na área cujos dados pudessem ser considerados confiáveis.

O Quadro 19 mostra as épocas de plantio que foram consideradas as melhores em cada trecho de curso d'água, em cada célula, de modo que a vazão dos rios fosse máxima no período mais seco do ano (de agosto a outubro).

Observa-se, no Quadro anterior, que as melhores épocas de plantio, em que menos se gasta água para fins de irrigação, foram as épocas de plantio que colocaram o ciclo da cultura no

período mais frio do ano. Conforme a duração do ciclo de cada cultura, a época de plantio variou entre o mês de maio, para culturas de ciclo mais longo, como o algodão, e o mês de junho, para culturas de ciclo mais curto, como o feijão e o milho.

3.2. Sensibilidade do Modelo

A sensibilidade do modelo de simulação foi analisada variando-se diversos parâmetros de entrada do mesmo e verificando-se a resposta do modelo a tal variação.

3.2.1. Coefficiente de "run-off"

O coeficiente de "run-off" (C) é utilizado apenas na equação 2.44, e tem influência apenas na vazão dos cursos d'água na época chuvosa. Utilizaram-se três valores de C: 0,10; 0,20 (padrão) e 0,30.

No caso em que C foi igual a 0,10, observou-se uma queda na vazão dos cursos d'água apenas nos meses chuvosos, com desvios entre 0,3 % e 36 % da vazão obtida na simulação padrão.

Para o caso em que C foi igual a 0,30, observou-se, dessa vez, um aumento na vazão dos cursos d'água nos meses chuvosos, na razão de 0,3 % a 36 % da vazão obtida na simulação-padrão, quando C foi considerado igual a 0,20.

Não foi verificada nenhuma alteração nas vazões de irrigação das células, nem nas épocas de plantio.

3.2.2. Eficiência dos Sistemas de Irrigação

A eficiência dos sistemas de irrigação influencia apenas a equação 2.45, que determina a vazão de irrigação de uma célula. Foram utilizados, numa primeira simulação, os valores de ϵ constantes no Quadro 17 (padrão) e, numa segunda, os mesmos valores reduzidos 20 %.

Observou-se uma queda de até 0,7 % na vazão dos cursos d'água na época de irrigação e um aumento entre 24,1 e 27,5 % na vazão das células. Não foi notada nenhuma alteração nas épocas de plantio.

3.2.3. Nível de Probabilidade

O nível de probabilidade afeta os valores de evapotranspiração, precipitação e vazão dos rios, sendo um dos parâmetros mais importantes do modelo. Espera-se que um incremento no nível de probabilidade leve a um aumento na vazão calculada das células. Foi testado, além do nível de probabilidade original de 75 %, também o nível de 90 %.

Ao se testar o nível de 90 % de probabilidade, foram observadas reduções entre 19 % e 70 % nas vazões dos rios e incrementos na vazão das células entre 64 % e 157 %, não sendo verificadas, porém, alterações na época de plantio.

3.2.4. Profundidade do Sistema Radicular

A profundidade do sistema radicular é utilizada no cálculo da quantidade de água armazenada no solo. Este parâmetro tem influência considerável na determinação do intervalo entre as irrigações, porém não tem muita importância no caso de planejamento de vazões, principalmente em longos períodos (um mês, como é o caso).

Foram utilizadas, além dos valores propostos no item 2.6, as seguintes profundidades efetivas máximas, propostas por DOORENBOS e KASSAM (1976), que podem ser usadas para solos não adensados: algodão (200 cm), feijão (50 cm) e milho (150 cm).

Entretanto, não foi observada qualquer modificação nas vazões dos cursos d'água nas vazões das células, nem nas épocas de plantio.

3.3. Validação do Modelo

É extremamente difícil validar os resultados obtidos por um modelo desta natureza, pois os mesmos teriam de ser comparados com os valores reais de vazão dos rios, quando todos os sistemas de irrigação cadastrados estivessem em funcionamento, com as culturas plantadas nas épocas correspondentes durante todo um ano.

Assim, sugere-se, para um futuro trabalho, a simulação de uma bacia hidrográfica de pequenas dimensões e que possa ser completamente controlada pelo pesquisador, com a finalidade de validar o modelo.

4. CONCLUSÕES

Em regiões onde a concentração de áreas irrigadas é elevada, a água de alguns cursos d'água é tão amplamente usada para irrigação que o nível do rio baixa drasticamente na época seca (que coincide com a época de maior demanda de irrigação), prejudicando o fornecimento de água aos irrigantes que estão situados mais a jusante.

Existem algumas maneiras de solucionar ou atenuar estes problemas:

- (a) vender da água de irrigação;
- (b) aumentar a oferta de água (construção de reservatórios);
- (c) reduzir a demanda, manejando o consumo do recurso hídrico, variando-se a época de plantio das culturas irrigadas.

Com vistas na terceira das hipóteses, construiu-se um modelo de simulação que determina o consumo de água de um curso d'água, para fins de irrigação, conforme as épocas de plantio das culturas irrigadas; simulou-se, então, o funcionamento de um trecho da bacia do rio Verde Grande,

determinando as épocas do ano para o plantio em cada propriedade irrigada, de modo que o consumo de recurso hídrico de superfície para fins de irrigação seja mínimo.

Os valores de necessidades hídricas das culturas foram determinados em função dos valores da evapotranspiração potencial e da precipitação que têm 75% de probabilidade de ocorrência. Os valores das vazões dos cursos d'água utilizados também foram aqueles que têm 75% de probabilidade de ocorrência.

Crê-se que os resultados obtidos superestimem a realidade, ou seja, as vazões calculadas pelo modelo são maiores que a que ocorre realmente, em razão de dois fatores:

(a) Os irrigantes tendem a aplicar mais água do que é realmente necessário, desperdiçando o recurso hídrico.

(b) É impossível manter o cadastro de todos os irrigantes atualizado, portanto é possível que haja na região mais irrigantes do que o que foi informado ao modelo.

O modelo mostrou-se sensível aos parâmetros de entrada testados, porém sua validação não pôde ser feita neste trabalho, em razão da complexidade da bacia hidrográfica simulada.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. Q. J. Meteor. Soc., 50:121-6. 1924.
2. BERNARDO, S. Manual de Irrigação. Viçosa, Imprensa Universitária, 1989. 463 p.
3. BRASIL. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Divisão de Controle de Recursos Hídricos. Inventário das estações pluviométricas. Brasília, 1987. s.p.
4. BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. Q. J. R. Meteor. Soc., 58:389-420, 1932.
5. CHOW, V.T. Handbook of applied hydrology. s.l., McGraw-Hill, 1964. 1418 p.
6. COELHO, D. T. The consideration of temperature in corn (Zea Mays L.) growth and development models. s.l., Purdue Univ., 1978. 70 p. (Tese Ph.D.).
7. DOORENBOS, J. & KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome, FAO, 1979. 193 p. (FAO irrigation and drainage paper, 33).
8. DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome, FAO, 1977. 144 p. (FAO irrigation and drainage paper, 24).
9. EMSHOFF, J. R. & SISSON, R. L. Design and use of computer simulation models. 1.ed. N. York, Macmillan Publishing, 1970. 302 p.
10. FRÈRE, M. & POPOV, G. F. Prógnostico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos. Rome, FAO, 1986. 194 p.

11. FRIZZONE, J. A. Análise de cinco modelos para cálculo da distribuição e frequência de precipitações na região de Viçosa, MG. Viçosa, UFV, 1979. 100 p. (Tese M.S.).
12. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS / CETEC. Diagnóstico ambiental do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1983. 158 p. (Série de publicações técnicas).
13. GLOVER, J. & McCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. Q. J. R. Meteor. Soc., 84:172-5, 1958.
14. HARGREAVES, G. A. Monthly precipitation probabilities for northeast Brazil, Logan, Utah St. Univ., 1973. 403 p.
15. HOROWITZ, E. & SAHNI, S. Fundamentos de estrutura de dados. Rio de Janeiro, Campus, 1986. 494 p.
16. IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Ontario, Academic Press, 1983. 390 p.
17. JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. N. York, ASCE, 1973. 215 p.
18. LINSLEY, R. K.; M. A. KOHLER; J. L. H. PAULHUS. Hydrology for engineers. 2.ed. N. York, McGraw-Hill, 1975. 482 p.
19. MAASS, A.; HUFSCHEMIDT, M.M.; DORFMAN, R.; THOMAS Jr., H. A.; MARGLIN, S. A.; FAIR, G. M. Design of water-resource systems. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1962. 620 p.
20. McGUINNESS, J. L. & PARMELE, L. H. Maximum potential evapotranspiration frequency east central U.S. Journal of the Irrig. and Drain. Division, Proceedings of the ASCE, 98(IR2):207-14. Jun. 1972.
21. MOTA, F.S. da; VERONA, L.A.F.; MOTA, J.F.A.S. NOVAES, L. E. S. M. O microcomputador na meteorologia agrícola. São Paulo, Nobel, 1989. 137 p.
22. NEMHAUSER, G.L. Introduction to dynamic programming. 1.ed. N. York, John Wiley & Sons, 1966. 256 p.
23. NIXON, P. R.; LAWLWSS, G. P.; RICHARDSON, G. V. Coastal california evapotranspiration frequencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the ASCE, 98(IR2):185-91, Jun. 1972.
24. PRÉSCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Transactions of the R. Soc. Aust. 64:114-8, 1940.
25. PRODUCTION YEARBOOK. Rome, FAO, 1984.

26. PRUITT, W. O.; von OTTINGEN, S.; MORGAN, D. L. Central California evapotranspiration frequencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the ASCE, 98(IR2):177-84, Jun. 1972.
27. RETROSPECTIVA DA AGROPECUÁRIA. Rio de Janeiro, FGV, 1989.
28. ROSENBERG, N. J. Frequency of potential evapotranspiration rates in central great plains. Journal of the Irrig. and Drain. Div., Proceedings of the ASCE, 98(IR2):203-6, Jun. 1972.
29. SÁ, P.S.C.G. Uso racional de equipamentos de irrigação. ITEM-Irrigação e Tecnologia Moderna, 41(2):32-6, 1990.
30. SEDIYAMA, G. C. Necessidade de água para os cultivos. Brasília, ABEAS, 1987. 143 p.
31. SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the Sun. Search, 2(5):172, 1971.
32. SPIEGEL, M. R. Manual de fórmulas e tabelas matemáticas. São Paulo, McGraw-Hill, 1973. 270 p.
33. STRAUSS, E. Administração de recursos hídricos para a irrigação. ITEM - Irrigação e tecnologia moderna. 38(1):19-21, 1989.
34. THOM, H.C.S. A note on gamma distribution. Monthly weather review, 86(4):117-21, 1958.
35. ----- Some methods of climatological analysis. Geneva, WMO, 1966. 53 p. (WMO technical note, 81).
36. VELOSO, P.; SANTOS, C.; AZEREDO, P. FURTADO, A. Estruturas de dados. Rio de Janeiro, Campus, 1986. 228 p.
37. VILLELA, S.M. & MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.
38. WIRTH, N. Algorithms + data structures = programs. Englewood Cliffs, N. Jersey, Prentice-Hall, 1976. s. p.
39. WRIGHT, J. L.; JENSEN, J. E. Peak water requirements of crops in southern Idaho. Jour. of the Irrig. and Drain. Div., Proceedings of the ASCE, 98(IR2):193-201, Jun. 1972.

REFERÊNCIAS GERAIS

1. ALVES, A.R. O balanço de radiação: tratamento e aplicações em projetos de irrigação. Viçosa, Imp. Univ., 1989. s.p.
2. BERNARD, M. The primary role of meteorology in flood flow estimating, Trans. ASCE, vol. 109, p.311-82, 1944.
3. BRASIL. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Divisão de Controle de Recursos Hídricos. Inventário das estações fluviométricas. Brasília, 1987. s.p.
4. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Sistema de Informações Estatísticas do Setor de Energia Elétrica. Codificação dos cursos d'água brasileiros. Rio de Janeiro, 1978. 128 p.
5. BURAS, N. Dynamic programming methods applied to watershed management problems. Transactions of the ASAE, 5(1):3-5, 1962.
6. EIDMAN, V. R. Economic efficiency in the allocation of irrigation water over time. s.l., s.ed., 1972. 281 p.
7. HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph, ASAE, 1982. 533 p.
8. HALL, W.A. & BURAS, N. The dynamic programming approach to water-resources development, Jour. Geophysical Research, 66(2):517-20, 1961.
9. _____. Optimum irrigated practice under conditions of deficient water supply, Transact. of ASAE, 4(1):131-4, 1961.

10. KENNEDY, J. O. S. Dynamic programming - Applications to agriculture and natural resources. s.l., Elsevier, 1986. 341 p.
11. NAYLOR, T. H.; BALINTFY, J. L.; BURDICK, D. S.; CHU, K. Computer simulation techniques. s.l., John Wiley & Sons, 1968. 352 p.
12. NAYLOR, T. H. & FINGER, J. M. Verification of computer simulation models. Management Science, 14(2):92-101, 1967
13. RIDDER, N. A. & EREZ, A. Optimum use of water resources. Wageningen, ILRI, 1977. 250 p.
14. SHANNON, R. E. Systems simulation - the art and science. 1.ed. Englewood Cliffs, N. Jersey, Prentice-Hall, 1975. 387 p.
15. TOLLEY, G. S. & RIGGS, F. E. Economics of watershed planning, Ames, Iowa, The Iowa St. Univ. Press, 1961.
16. VAREJÃO-SILVA, M.A. & CEBALLOS, J.C. Meteorologia Geral I. Campina Grande, UFPb (CCT) - FUNAPE - CNPq, 1982. 74 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

QUADRO 1A - Síntese dos Programas Utilizados (Listados no Apêndice B)

Nome	Arquivos de dados	Arquivos de resultados	Objetivo	Listagem página
GeraETP	83437.OUT	83437.ETP	Gerar, a partir de dados climáticos, dados de evapotranspiração potencial, utilizando-se dos métodos de Penman ou da Radiação, conforme o caso.	74
MakeCoor	AREAS.PRN AREAS.DTA	COORD.DFN	Calcular, a partir das coordenadas dos limites das sub-bacias hidrográficas, as coordenadas geográficas (latitude e longitude desses limites).	81
MakeArea	AREAS.PRN AREAS.DTA	AREAS.OUT	Calcular, a partir das coordenadas dos limites das sub-bacias hidrográficas, a área em km ² de cada sub-bacia.	82
MakeIPdA	PREC.DFN COORD.DFN	IPDA.DFN	Calcular a integral de superfície da precipitação na diferencial de área dA. A integral total representa o total de precipitação que cai numa sub-bacia num período.	83
MakeTree	PREARV.DFN IRRIGANT.DFN	ARVORE.DFN	Montar os dois arquivos de dados (no formato texto) num único arquivo, com formato pré-definido.	87
Simula	ARVORE.DFN CULTURAS.DFN ETP.DFN FLUVIO.DFN KC.DFN PREC.DFN PERIODOS.DFN	RESULVC.DFN RESULCEL.DFN RESULVAZ.DFN	Executa a simulação.	89

QUADRO 2A - Arquivos de Dados / Resultados Utilizados pelos Programas

Nome	Informações Contidas
83437.OUT	Temperatura média, máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), insolação (h) e velocidade do vento (km/dia).
83437.ETP	ETP por período, por ano, naquela estação.
AREAS.PRN	Coordenadas, em mm, dos vértices dos polígonos que representam as sub-bacias, medidas num mapa da região em estudo na escala de 1:350.000.
AREAS.DTA	Número de ordem dos vértices que estão relacionados com cada sub-bacia.
AREAS.DFN	Área, em km^2 , de cada sub-bacia da região em estudo.
PREC.DFN	Precipitação, em mm, a 75% de probabil., por período e estação pluviométrica.
IPDA.DFN	Volume de água precipitado, por período do ano e sub-bacia da região em estudo.
PREARV.DFN	Ponteiro para a árvore mãe, ponteiros para as sub-árvores, código daquele nodo, nome do curso d'água, trecho do curso d'água, número de irrigantes naquele trecho, coeficiente de deflúvio para aquele trecho, área acumulada de captação (km^2), comprimento daquele trecho de rio (km), integral da precipitação em dA no período p, em m^3/s .
IRRIGANT.DFN	Cadastro completo dos irrigantes.
ARVORE.DFN	Ponteiro para a árvore mãe, ponteiros para as sub-árvores, código daquele nodo, nome do curso d'água, trecho do curso d'água, número de irrigantes naquele trecho, coeficiente de deflúvio para aquele trecho, área acumulada de captação (km^2), comprimento daquele trecho de rio (km), integral da precipitação em dA no período p, em m^3/s , e irrigantes daquele trecho do rio.
CULTURAS.DFN	Nome da cultura, profundidade máxima do sistema radicular (m), épocas mínima e máxima de plantio que serão consideradas para a simulação.
ETP.DFN	ETP, em mm, a 75% de probabilidade, por período, para a região em estudo.
FLUVIO.DFN	Vazão, em m^3/s , do rio Verde Grande, na estação fluviométrica 44600000, por período do ano. Inclui área de captação da bacia em km^2 .
KC.DFN	Comprimento, em dias, do ciclo da cultura; coeficientes de cultura, por período. Cada linha contém dados a respeito de uma época de plantio.
PERIODOS.DFN	Duração, em dias, de todos os períodos do ano.
RESULVAZ.DFN	Vazões finais (QF) simuladas, em m^3/s , por período, para cada trecho de curso d'água, na melhor combinação de época de plantio.
RESULCEL.DFN	Épocas do ano em que as culturas deverão ser plantadas, por célula.
RESULVC.DFN	Vazões, por célula, na melhor combinação de plantio.

APÊNDICE B

B.1 Listagem do Programa GeraETP (Arquivos "GeraETP.Pas" e "ETP.Pas")

B.1.1 "GeraETP.Pas"

```

program geraetp;

uses etp;

var arq, arqsaida : text;
    estacao : string[5];
    contUR, contVv : array[1..36] of byte;
    somaUR, somaVv : array[1..36] of real;
    deci : integer;
    ET, Tm, UR, Vv, Ins : real;

function altitude: real;
var alt : real;
begin
    if estacao = '83338'
    then alt:= 570
    else if estacao = '83388'
    then alt:= 604
    else if estacao = '83395'
    then alt:= 516
    else if estacao = '83437'
    then alt:= 646;

    altitude:= alt;
end;

function latitude: real;
var lat : real;
begin
    if estacao = '83338'
    then lat:= -14.9333
    else if estacao = '83388'
    then lat:= -15.15
    else if estacao = '83395'
    then lat:= -15.7833
    else if estacao = '83437'
    then lat:= -16.7167;

    latitude:= lat;
end;
begin ( programa GeraEtp )
    assign(arq,paramstr(1) + '.OUT');

```

```

reset(arq);
assign(arqsaida,paramstr(1) + '.ETP');
rewrite(arqsaida);
fillchar(contUR,sizeof(contUR),0);
fillchar(contVv,sizeof(contVv),0);
while not eof(arq) do
begin
  readln(arq,estacao,deci,Tm,UR,Vv,Ins);
  TMAnt:= Tm;
  if UR > 0 then begin
    inc(contUR[deci]);
    somaUR[deci]:= somaUR[deci] + UR;
  end;
  if Vv > 0 then begin
    inc(contVv[deci]);
    somaVv[deci]:= somaVv[deci] + Vv;
  end;
  if (Tm > 0) and (UR > 0) and (UR < 100)
    and (Vv >= 0) and (Ins >= 0) then
  begin
    ET:= ETPenman(deci,altitude,latitude,Tm,Ins,UR,Vv);
    if deci mod 3 in [1,2] then ET:= 10*ET
      else ET:= (ult((deci-1) div 3 + 1)-20)*ET;
    writeln(arqsaida,estacao,deci:3,ET:6:1);
  end
  else begin
    if (Tm > 0) and (Ins >= 0)
      then begin
        if (UR <= 0) or (Vv <= 0)
          then begin
            if contUR[deci] > 0 then UR:= somaUR[deci]/contUR[deci];
            if contVv[deci] > 0 then Vv:= somaVv[deci]/contVv[deci];
          end;
        if (UR > 0) and (Vv > 0) then
          begin
            ET:= ETMakking(deci,altitude,latitude,Tm,Ins,UR,Vv);
            if deci mod 3 in [1,2] then ET:= 10*ET
              else ET:= (ult((deci-1) div 3 + 1)-20)*ET;
            writeln(arqsaida,estacao,deci:3,ET:6:1);
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
close(arq);
close(arqsaida);
end. ( GeraETP )

```

B.1.2 "ETP.Pas"

```

unit etp;

interface

CONST Cp = 0.24;          ( Calor especifico do ar, em cal/cm-3/C )

function ETPenan(dec:integer; alt,lat,Tm,ins,ur,u10:real): real;

function ETMakking(dec:integer; alt,lat,Tm,ins,ur,u10:real): real;

function ult(mes: byte): byte;

implementation

(-----)
(           Fornece quantos dias tem o mes em questao           )
(-----)

function ult(mes: byte): byte;
var n: byte;
begin
  case mes of
    1: n:= 31;
    2: n:= 28;
    3: n:= 31;
    4: n:= 30;
    5: n:= 31;
    6: n:= 30;
    7: n:= 31;
    8: n:= 31;
    9: n:= 30;
    10: n:= 31;
    11: n:= 30;
    12: n:= 31;
  else n:= 30;
  end;
  ult:= n;
end; ( ult )

(-----b-----)
( I           Funcao para calcular y = a           I )
(-----)

function EXPO(a,b:real):real;

var y : real;

begin

```

```

if abs(b) <= 1E-6
then expo:= 1
else if a <= 1E-6
then expo:= 0
else
begin
  if (ln(abs(a)) < 0) and (b * ln(abs(a)) < -80)
  then y:= 0
  else if (b * ln(abs(a)) >= 57)
  then y:= 1.0e25
  else y:= exp(b * ln(abs(a)));
  expo:= y
end;
end;

(-----)
(   Retorna o angulo de declinacao solar, em rad, conforme o dia do ano   )
(-----)

function declin(dia:integer): real;
begin
  dia:= dia mod 366;
  declin:= 0.40928 * cos(2*pi*(dia-172)/365);
end;

(-----)
(           Retorna o arco (em rad) cujo cosseno vale x                   )
(-----)

function ARCCOS(x:real):real; ( retorna o arccos(x) em rad   )
                               ( onde x e' o cosseno do angulo )
var arco : real;
begin
  if x = 0 then arco:= pi/2
  else begin
    arco:= arctan(sqrt(1-sqr(x))/x);
    if arco < 0 then arco:= arco + pi;
  end;
  arccos:= arco;
end;

(-----)
(           Retorna o angulo horario do nascer do sol, em rad           )
(-----)

function AngHor(declinacao,latitude: real(em radianos)) : real;
begin
  AngHor:= arccos(-sin(latitude)*sin(declinacao)/(cos(latitude)*cos(declinacao)));
end;

(-----)
(   Retorna o comprimento do dia, em h, conforme o angulo horario, em radianos   )
(-----)

```

```

function CompDia(AngHorario: real (em radianos)): real;
begin
  CompDia:= 2/15*(abs(AngHorario)*180/pi);
end;

(*****)

function ETPenman(dec:integer; alt,lat,Tm,ins,ur,ui0:real): real;

( Calcula a evapotransp. diaria pelo metodo de Penman modificado pela FAO )
( Fonte: Sedyama, G.C., 1987 )

Const
  albedo = 0.23; ( albedo da superficie )
  w1      = 1.00; ( parametros do termo de adveccao )
  w2      = 0.0161; ( idem )
  a1      = 0.34; ( constante empirica )
  b1      = -0.044; ( idem )

Var

(Tm      temperatura media diaria, C )
(ur      umidade relativa do ar, % )
(ui0     velocidade do vento a 10 m de altura, milhas/dia )
(lat     latitude do local, graus )
(Alt     altitude, m )
(ins     numero de horas de brilho solar diario, h )

delta,   ( de/dt, mb.C )
gama,    ( constante psicrometrica, mb.C )
Rn,      ( Saldo de radiacao solar `a superficie, cal/cm2/dia )
u2,      ( velocidade do vento a 2 m de altura, milhas/dia )
ea,      ( pressao atual de vapor, mb )
es,      ( pressao de saturacao de vapor, mb )
Pressao, ( mb )
L,       ( calor latente de vaporizacao, cal/cm3 )
Rs,      ( radiacao solar global, cal/cm2/dia )
Rso,     ( idem, para dias sem nuvens )
Rb,      ( saldo de radiacao de ondas longas `a superficie,cal/cm2/dia)
Ngrande, ( comprimento do dia, horas )
a,       ( constante da equacao de Angstrom )
b,       ( idem )
X,       ( _ angulo relativo do dia juliano (1/1=zero; 30/6=pi) )
DD,      ((D/D)**2, ou seja, parametro relativo `a distancia Terra-Sol)
declinacao, ( angulo de declinacao da Terra, radianos )
H        :real; ( angulo horario correspondente ao nascer e por do sol )

begin (ETPenman)
  lat:= lat*pi/180; ( Converte graus para radianos )
  Pressao:= 1013 - 0.0161 * alt;
  L:= 595 - 0.51 * Tm;
  gama:= Cp * Pressao / (0.622 * L);
  delta:= 2 * expo(0.00738 * Tm + 0.8072,7) - 0.00116;

```

```

a:= 0.29 * cos(lat);
b:= 0.52;
X:= 2*pi*(deci*10-6)/365; ( em radianos )
DD:= 1.000110 + 0.034221*cos(X) + 0.001280*sin(X) + 0.000719*cos(2*X) + 0.000077*sin(2*X);
declinacao:= declin(deci*10-6); ( em radianos )
H:= AngHor(declinacao,lat); ( em radianos )
Ngrande:= CompDia(H);
Rso:= 889.23 * DD * (H*sin(lat)*sin(declinacao)+cos(lat)*cos(declinacao)*sin(H));
Rs:= Rso * (a + b*(ins/Ngrande));
es:= 1.3329 * exp(21.07 - 5336.0/(Tm + 273.2)); ( mb )
ea:= ur*es/100*(760/1013); ( mmHg )
Rb:= 1.1713E-7 * expo(Tm+273.2,4) * (0.09 * sqrt(ea) - 0.56) * (0.1 + 0.9 * ins/Ngrande);
Rn:= (1-albedo) * Rs + Rb;
u10:= u10/1.609; ( Converte velocidade do vento de km/dia para milhas/dia )
u2:= u10 * expo(2/10,1/7);
ETPenman:= (delta / (delta+gama) * Rn + gama/(delta+gama) * 15.36 * (w1+w2*u2) *
(es-ea)) * (10/L);
end; (ETPenman)

```

```
(*****)
```

```
function ETMakking(deci:integer; alt,lat,Tm,ins,ur,u10:real): real;
```

```
var pressao,
```

```
    L,
```

```
    gama,
```

```
    delta,
```

```
    u2,
```

```
    a, b,
```

```
    X, DD,
```

```
    declinacao,
```

```
    H, Ngrande, Rso,
```

```
    Rs, ET, Vday : real;
```

```
    EscalaUR, EscalaV : byte;
```

```
begin ( ETMakking )
```

```
    lat:= lat*pi/180; ( Converte graus para radianos )
```

```
    u2:= u10 * expo(2/10,1/7); ( Converte u a 10 m para 2 m (Km/dia) )
```

```
    Vday:= 1.33*u2; ( Converte U10 para velocidade media diaria do vento )
```

```
    Vday:= Vday/86.4; ( Converte km/dia para m/s )
```

```
    Pressao:= 1013 - 0.0161 * alt;
```

```
    L:= 595 - 0.51 * Tm;
```

```
    gama:= Cp * Pressao / (0.622 * L);
```

```
    delta:= 2 * expo(0.00738 * Tm + 0.8072,7) - 0.00116;
```

```
    a:= 0.29 * cos(lat);
```

```
    b:= 0.52;
```

```
    X:= 2*pi*(deci*10-6)/365; ( em radianos )
```

```
    DD:= 1.000110 + 0.034221*cos(X) + 0.001280*sin(X) + 0.000719*cos(2*X) + 0.000077*sin(2*X);
```

```
    declinacao:= declin(deci*10-6); ( em radianos )
```

```
    H:= AngHor(declinacao,lat); ( em radianos )
```

```
    Ngrande:= CompDia(H); ( em horas )
```

```
    Rso:= 889.23 * DD * (H*sin(lat)*sin(declinacao)+cos(lat)*cos(declinacao)*sin(H));
```

```
    Rs:= Rso * (a + b*(ins/Ngrande));
```

```
    ET:= delta/(delta+gama)*Rs*10/L;
```

```

                                ( UR de 0 a 100 % )
                                ( Vday em m/s      )
if ur >= 70
  then EscalaUR:= 4
  else if ur >= 55
    then EscalaUR:= 3
    else if ur >= 40
      then EscalaUR:= 2
      else EscalaUR:= 1;
if Vday >= 8
  then EscalaV:= 4
  else if Vday >= 5
    then EscalaV:= 3
    else if Vday >= 2
      then EscalaV:= 2
      else EscalaV:= 1;

case EscalaUR of
                                ( UR de 0 a 100 % )
                                ( Vday em m/s      )
  1 : case EscalaV of
      1 : ET:= -0.40 + 1.024 * ET;
      2 : ET:= -0.37 + 1.136 * ET;
      3 : ET:= -0.28 + 1.193 * ET;
      4 : ET:= -0.20 + 1.267 * ET;
    end;

  2 : case EscalaV of
      1 : ET:= -0.54 + 0.990 * ET;
      2 : ET:= -0.33 + 1.042 * ET;
      3 : ET:= -0.16 + 1.090 * ET;
      4 : ET:= -0.18 + 1.183 * ET;
    end;

  3 : case EscalaV of
      1 : ET:= -0.46 + 0.891 * ET;
      2 : ET:= -0.67 + 0.995 * ET;
      3 : ET:= -0.44 + 1.015 * ET;
      4 : ET:= -0.47 + 1.084 * ET;
    end;

  4 : case EscalaV of
      1 : ET:= -0.63 + 0.833 * ET;
      2 : ET:= -0.52 + 0.870 * ET;
      3 : ET:= -0.62 + 0.948 * ET;
      4 : ET:= -0.55 + 0.985 * ET;
    end;

end;

ETMakking:= ET;

end; ( ETMakking )

end. ( fim da unidade ETP )

```

B.2 Listagem do Programa MAKECOORD (Arquivo "MakeCoord.Pas")

```

program makecoord;

const
  escala = 0.35;
  pontos = 92;
  NumRios = 33;

var
  arqpontos, arqcoord, arqout : text;

  codigo : string[10];

  numvertices, i, j : byte;

  vertice : array [1..NumRios,1..15] of byte;

  cart : array [1..pontos] of record
    x,y : real;
  end;

  geog : array [1..pontos] of record
    lat,long : real;
  end;

begin
  assign(arqpontos,'AREAS.DTA');
  assign(arqcoord,'AREAS.PRN');
  assign(arqout,'COORD.DFN');
  reset(arqpontos);
  reset(arqcoord);
  rewrite(arqout);
  for i:= 1 to pontos do
    readln(arqcoord,card[i].x,card[i].y);
  for i:= 1 to NumRios do
    begin
      read(arqpontos,codigo,NumVertices);
      write(arqout,NumVertices:4);
      for j:= 1 to NumVertices do
        begin
          read(arqpontos,vertice[i,j]);
          geog[j].lat:= -16.166 - card[vertice[i,j]].y/(5.2*60);
          geog[j].long:= -44.049 + card[vertice[i,j]].x/(5.1*60);
          write(arqout,geog[j].lat:8:3,geog[j].long:8:3);
        end;
      readln(arqpontos);
      writeln(arqout);
    end;
  close(arqout);
  close(arqpontos);
  close(arqcoord);
end. ( MakeCoord )

```

B.3 Listagem do Programa MAKEAREA (Arquivo "MakeArea.Pas")

```

program MakeArea;

const Numtrechos = 33;
      escala = 0.35 ; (1 mm = 0.35 km ou 1:350.000 )
var
  arqin1,
  arqin2,
  arqout : text;
  codigo : string[10];
  soma,
  area   : real;
  NumPts,
  i,j,k  : byte;
  x,y    : array [1..92] of real;
  vetor  : array [1..15] of byte;

begin
  assign(arqin1,'AREAS.PRN');
  assign(arqin2,'AREAS.DTA');
  assign(arqout,'AREAS.OUT');
  reset(arqin1);
  reset(arqin2);
  rewrite(arqout);
  for i:= 1 to 92 do
    readln(arqin1, x[i], y[i]);
  soma:= 0;
  for i:= 1 to Numtrechos do
    begin
      read(arqin2,codigo,NumPts);
      fillchar(vetor,sizeof(vetor),0);
      for j:= 1 to NumPts do
        read(arqin2,vetor[j]);
      readln(arqin2);
      area:= 0;
      for k:= 1 to NumPts-1 do
        area:= area + (x[vetor[k]]+x[vetor[k+1]])*(y[vetor[k+1]]-y[vetor[k]]);
      area:= area + (x[vetor[NumPts]]+x[vetor[1]])*(y[vetor[1]]-y[vetor[NumPts]]);
      area:= area/2;
      area:= abs(area*sqr(escala));
      soma:= soma + area;
      writeln(arqout,codigo,area:7:2);
    end;
  writeln(arqout);
  writeln(arqout,'Area total = ',soma:7:2);
  close(arqin1);
  close(arqin2);
  close(arqout);
end. ( MakeArea )

```

B.4 Listagem do Programa MAKEIPDA (Arquivo "MakeIPdA.Pas")

```

program MakeIPdA;
( Gera um arquivo IPDA.DFN a partir dos arquivos PREC.DFN e COORD.DFN )

uses crt, dos;

const
  NumCulturas = 3; ( Numero maximo de culturas que farao parte da simulacao )
  NumRios      = 33; ( Numero de trechos de rios na sub-bacia hidrografica )
  NumEstacoes = 10; ( Numero de estacoes de dados pluviometricos )
  NumIrrig     = 10; ( Numero maximo de irrigantes por trecho de rio. No caso )
                  ( desse valor ser alterado para um valor maior do que 10, )
                  ( ha' a necessidade de se alterar o procedimento COMBINE )
  CompMax      = 15; ( Comprimento maximo que um ciclo de cultura pode ter )
  Periodos     = 12; ( Divisao do ano em n periodos )

type
  tipo_estacao = record
    lat,
    long : real;
    prec : array [1..Periodos] of real;
  end;

var
  arqprec,
  arqareas,
  arqipda,
  arqperiodo : text;

  dentro      : boolean;
  NumVertices,
  r, p, i, j,
  v, pt       : byte;
  DuracPer    : array [1..periodos] of byte; ( duracao em dias de cada periodo )
  Estacao     : array [1..NumEstacoes] of tipo_estacao; ( Precipitacao na regioao )
  vertice     : array [0..12] of record
    x,        ( latitude )
    y,        ( longitude )
    a,        ( coeficiente de declividade )
    b : real; ( intercepto )
  end;

  IPdA        : array [1..periodos] of real;
  Xpt, Ypt,
  XMax, YMax,
  XMin, YMin : real;

($I INTERPRE.PAS )

procedure CursorOff;
var regs : registers;
begin

```

```

with regs do
begin
  AX:=$0100;
  CX:=(9 shl 8) + 7;
  intr($10,regs);
end;
end; ( CursorOff )

procedure CursorOn;
var regs : registers;
begin
  with regs do
  begin
    AX:=$0100;
    CX:=(0 shl 8) + 7;
    intr($10,regs);
  end;
end; ( CursorOn )

function DentroPoligono(Xpt, Ypt : real; pt: byte): boolean;
begin
  if vertice[pt].x >= vertice[pt-1].x
  then DentroPoligono:= Ypt <= (vertice[pt].a * Xpt + vertice[pt].b)
  else DentroPoligono:= Ypt >= (vertice[pt].a * Xpt + vertice[pt].b);
end; ( DentroPoligono )

begin ( MakeIPdA )
  clrscr;
  cursoroff;
  writeln('MAKEIPdA v. 1.00');
  writeln('Calcula t P . dA para as sub-bacias');
  writeln('      u');
  assign(arqprec, 'PREC.DFN');
  assign(arqareas, 'COORD.DFN');
  assign(arqPeriodo, 'PERIODOS.DFN');
  assign(arqipda, 'IPDA.DFN');
  reset(arqprec);
  reset(arqareas);
  reset(arqPeriodo);
  rewrite(arqipda);
  readln(arqPeriodo);
  readln(arqPeriodo);
  for i:= 1 to NumEstacoes do      ( Lendo dados de Precipitacao )
  begin
    read(arqPrec, Estacao[i].lat);
    read(arqPrec, Estacao[i].long);
    for j:= 1 to Periodos-1 do
      read(arqPrec, Estacao[i].Prec[j]);
    readln(arqPrec, Estacao[i].Prec[Periodos]);
  end;
  fillchar(vertice, sizeof(vertice), 0);
  for p:= 1 to periodos do
    readln(arqperiodo, DuracPer[p]);
  gotoxy(1,7); write('Rio = 1'); gotoxy(78,7); write(NumRios:2);

```

```

for r:= 1 to NumRios do
begin
  gotoxy(9,7); write(chr(220):trunc(r/NumRios*69));
  XMax:= - maxlongint;
  YMax:= - maxlongint;
  XMin:= maxlongint;
  YMin:= maxlongint;
  read(arqareas,NumVertices);
  for v:= 1 to NumVertices do
  begin
    read(arqareas,vertice[v].y,vertice[v].x);
    if XMin > vertice[v].x then XMin:= vertice[v].x;
    if XMax < vertice[v].x then XMax:= vertice[v].x;
    if YMin > vertice[v].y then YMin:= vertice[v].y;
    if YMax < vertice[v].y then YMax:= vertice[v].y;
  end; ( v )
  readln(arqareas);
  gotoxy(1,8); write('X = ',XMin:6:3); gotoxy(74,8); write(XMax:6:3);
  gotoxy(1,9); write('Y = ',YMin:6:3); gotoxy(74,9); write(YMax:6:3);
  vertice[0].x:= vertice[NumVertices].x;
  vertice[0].y:= vertice[NumVertices].y;
  for v:= 1 to NumVertices do
  begin
    vertice[v].a:= (vertice[v].y - vertice[v-1].y)/(vertice[v].x - vertice[v-1].x);
    vertice[v].b:= vertice[v-1].y - ((vertice[v].y - vertice[v-1].y) * vertice[v-1].x /
      (vertice[v].x - vertice[v-1].x))
  end; ( v )
  fillchar(IPdA,sizeof(IPdA),0);
  Xpt:= XMin;
  gotoxy(12,8); write(' ');
  while Xpt <= XMax do
  begin
    gotoxy(12,8); write(chr(220):trunc((Xpt-XMin)/(XMax-XMin)*64));
    gotoxy(12,9); write(' ');
    Ypt:= YMin;
    while Ypt <= YMax do
    begin
      gotoxy(12,9); write(chr(220):trunc((Ypt-YMin)/(YMax-YMin)*64));
      dentro:= true;
      for pt:= 1 to Numvertices do
        dentro:= dentro and DentroPoligono(Xpt,Ypt,pt);
      if dentro then
        for p:= 1 to Periodos do
          IPdA[p]:= IPdA[p] + InterPrec(p,Xpt,Ypt); ( IPdA em mm * 36" 2 )
          ( ou mm * 1.2321 km2 )
          Ypt:= Ypt + 0.01; ( incrementa y em 36" ) ( ou 1.2321E-6 km3 = 1232.1 m3 )
        end; ( Ypt ) ( Considerando 1 grau = 111 km )
        Xpt:= Xpt + 0.01; ( incrementa x em 36" )
      end; ( Xpt )
    for p:= 1 to Periodos do
    begin
      IPdA[p]:= IPdA[p]*1232.1/(86400*DuracPer[p]); ( convertendo para m3/s )
      write(arqipda,IPdA[p]:6:3);
    end;
  writeln(arqipda);

```

```
end; ( r )
close(arqprec);
close(arqareas);
close(arqPeriodo);
close(arqipda);
writeln;
writeln('Resultados no arquivo IPDA.DFN');
cursoron;
end. ( MakeIPdA )
```

B.5 Listagem do Programa MAKETREE (Arquivo "Maketree.Pas")

```

program maketree;

( Gera um arquivo ARVORE.DFN a partir dos arquivos PREARV.DFN, IRRIGANT.DFN )
( e IPDA.DFN )

const
  NumCulturas = 3; ( Numero maximo de culturas que farao parte da simulacao )
  NumRios     = 33; ( Numero de trechos de rios na sub-bacia hidrografica )
  NumEstacoes = 10; ( Numero de estacoes de dados pluviometricos )
  NumIrrig    = 10; ( Numero maximo de irrigantes por trecho de rio. No caso )
                ( desse valor ser alterado para um valor maior do que 10, )
                ( ha' a necessidade de se alterar o procedimento COMBINE )
  CompMax     = 15; ( Comprimento maximo que um ciclo de cultura pode ter )
  Periodos    = 12; ( Divisao do ano em n periodos )

type

  str6 = string[ 6];
  str8 = string[ 8];
  str9 = string[ 9];
  str20 = string[20];
  str45 = string[45];

  celula = record
    cod      : str8; ( codigo da celula no curso d'agua )
    abscissa : real; ( abscissa da celula no curso r (km) )
    cultura  : byte; ( cultura plantada; 1 = algodao; 2 = feijao; 3 = milho )
    lat      : real; ( latitude da celula )
    long     : real; ( longitude (para calculo da Precip. efetiva) )
    area     : real; ( area irrigada )
    efic     : real; ( eficiencia do sistema de irrigacao utilizado )
    CRH      : real; ( Capacidade de Retencao Hidrica do solo (mm/cm) )
  end;

  anual = array [1..Periodos] of real;

  lista = array [1..NumIrrig] of celula; ( irrigantes de um trecho de rio )

  nodo = record
    ant,          ( ponteiro para a arvore mae )
    esq, dir     : byte; ( ponteiros para as subarvores )
    codigo       : str6; ( codigo daquele nodo )
    Nome         : str20; ( Nome do curso d'agua )
    Trecho       : str45; ( Trecho do curso d'agua )
    celulas      : byte; ( Numero de irrigantes naquele trecho )
    Cd,          ( coeficiente de defluvio p/ aquele trecho)
    area,        ( Area acumulada de captacao (km2) )
    compr        : real; ( Comprimento daquele trecho de rio (km) )
    IPdA         : anual; ( Integral de Prec em dA no periodo p )
    irrigantes   : lista; ( irrigantes daquele trecho do rio )
  end;

```

```
var
```

```

rio : byte;
arqirrig,
arqipda,
arqarvin: text;
arqarvout : file of nodo;
no : nodo;
i,j : byte;
NomeIrrig : string[30];
Municipio : string[13];
TipoIrrig : string[18];
NomeRio : string[18];

```

```
begin
```

```

assign(arqarvin,'PREARV.DFN');
assign(arqirrig,'IRRIGANT.DFN');
assign(arqarvout,'ARVORE.DFN');
assign(arqipda,'IPDA.DFN');
reset(arqarvin);
reset(arqipda);
reset(arqirrig);
rewrite(arqarvout);
while not eof(arqarvin) do
begin
  fillchar(no,sizeof(no),0);
  read (arqarvin,no.ant,no.esq,no.dir,no.codigo,no.nome,no.trecho);
  readln(arqarvin,no.area,no.celulas,no.Cd,no.compr);
  for i:= 1 to periodos do
    read(arqipda,no.IPdA[i]);
  readln(arqipda);

  for i:= 1 to no.celulas do
    with no.irrigantes[i] do
      begin
        read(arqirrig,NomeIrrig,Cod,NomeRio,Municipio);
        read(arqirrig,area,TipoIrrig);
        readln(arqirrig,efic,abscissa,lat,long,cultura,CRH);
      end;
    write(arqarvout,no);
  end;
close(arqarvout);
close(arqipda);
close(arqarvin);
close(arqirrig);
end. ( MakeTree )

```

B.6 Listagem do programa SIMULA (Arquivos "Simula.Pas", "Simula.Prc" e "Interpre.Pas")

B.6.1 Arquivo "Simula.Pas"

```

program simulacao;

( Faz o calculo do consumo de agua dos cursos d'agua )
( Caminha pela arvore binaria )
( Selecciona as melhores combinacoes )

uses dos,crt;

($I SIMULA.PRC)

begin ( programa principal )
  ClrScr;
  GetTime(Hour, Minute, Second, Sec100);
  Writeln('Inicio da Simulacao. Hora Atual: ',LeadingZero(Hour),' ',LeadingZero(Minute),
    ' ',LeadingZero(Second));
  Abrir_Arquivos;
  Inicializar_variaveis;
  Alternativa:= 1;
  Pos_ordem(Arvore[1],1);
  Fechar_Arquivos;
  GetTime(Hour, Minute, Second, Sec100);
  Writeln;
  Writeln('Fim da Simulacao. Hora Atual: ',LeadingZero(Hour),' ',LeadingZero(Minute),
    ' ',LeadingZero(Second));
end. ( programa principal )

```

B.6.2 Arquivo "Simula.Prc"

```

const
  NumCulturas = 3; ( Numero maximo de culturas que farao parte da simulacao )
  NumRios      = 33; ( Numero de trechos de rios na sub-bacia hidrografica )
  NumEstacoes = 10; ( Numero de estacoes de dados pluviometricos )
  NumIrrig     = 10; ( Numero maximo de irrigantes por trecho de rio. No caso )
                 ( desse valor ser alterado para um valor maior do que 10, )
                 ( ha' a necessidade de se alterar o procedimento COMBINE )
  Periodos     = 12; ( Divisao do ano em n periodos )
  CompMax      = 8; ( Comprimento maximo que um ciclo de cultura pode ter )
                 ( Depende do tamanho do periodo )

  e1 : byte = 0;   e2 : byte = 0; ( A quantidade dessas variaveis e' igual )
  e3 : byte = 0;   e4 : byte = 0; ( ao valor da constante NumIrrig )

```

```
e5 : byte = 0;   e6 : byte = 0;
e7 : byte = 0;   e8 : byte = 0;
e9 : byte = 0;   e10 : byte = 0;
```

type

```
str6 = string[ 6];
str8 = string[ 8];
str9 = string[ 9];
str20 = string[20];
str45 = string[45];
```

celula = record

```
    cod      : str8; ( codigo da celula no curso d'agua )
    abscissa : real; ( abscissa da celula no curso r (km) )
    cultura  : byte; ( cultura plantada; 1 = algodao; 2 = feijao; 3 = milho )
    lat      : real; ( latitude da celula )
    long     : real; ( longitude (para calculo da Precip. efetiva) )
    area     : real; ( area irrigada (ha) )
    efic     : real; ( eficiencia do sistema de irrigacao utilizado )
    CRH      : real; ( Capacidade de Retencao Hidrica do solo (mm/cm) )
end;
```

tipo_cultura = record

```
    NomeCult : str8;
    PSRMax   : real; ( prof. maxima do sistema radicular (m) )
    MinPlant : byte; ( epoca minima de plantio )
    MaxPlant : byte; ( epoca maxima de plantio )
    DurCiclo : array [1..Periodos] of byte; ( duracao do ciclo da cultura )
                                           ( conforme a epoca de plantio )
end;
```

tipo_estacao = record

```
    lat,
    long : real;
    prec : array [1..Periodos] of real;
end;
```

anual = array [1..Periodos] of real;

lista = array [1..NumIrrig] of celula; (irrigantes de um trecho de rio)

nodo = record

```
    ant, ( ponteiro para a arvore mae )
    esq, dir : byte; ( ponteiros para as subarvores )
    codigo   : str6; ( codigo daquele nodo )
    Nome     : str20; ( Nome do curso d'agua )
    Trecho   : str45; ( Trecho do curso d'agua )
    celulas  : byte; ( Numero de irrigantes naquele trecho )
    Cd, ( coeficiente de defluvio p/ aquele trecho )
    area, ( Area acumulada de captacao (km2) )
    compr   : real; ( Comprimento daquele trecho de rio (km) )
    IPdA    : anual; ( Integral Prec em dA no periodo p (m3/s) )
    irrigantes : lista; ( irrigantes daquele trecho do rio )
```

```

end;

NodoPtr = ^nodo;

var
  arqArvore : file of nodo; ( dados dos trechos de rio ( nos da arvore ) )
  arqCultura : text; ( dados das culturas )
  arqFluvio : text; ( dados da estacao fluviometrica )
  arqKc : text; ( dados de Kc para todas as culturas e epocas de plantio )
  arqETP : text; ( dados de ETP para toda a regio )
  arqPrec : text; ( dados das estacoes pluviometricas )
  arqPeriodo : text; ( dados relativos `a subdivisao do ano em periodos )
  ArqResultVaz : text; ( resultados das melhores vazoes )
  ArqResultCel : text; ( resultados das melhores combinacoes de plantio )
  ArqResultVazCel : text; ( resultados das vazoes por celula na melhor combinacao )

  no : nodo;
  Arvore : array [1..NumRios] of NodoPtr;
  culturas : array [1..NumCulturas] of tipo_cultura;
  Kc : array [1..NumCulturas,1..Periodos,1..CompMax] of real;
  Estacao : array [1..NumEstacoes] of tipo_estacao; ( Precipitacao na regio )
  AEst : real; ( Area de captacao da estacao fluviometrica - km2 )
  QEst : anual; ( Vazao na estacao fluviometrica (m3/s) )
  ETP : anual;
  QF : array [1..NumRios,1..Periodos] of real;
      ( vazoes finais do trecho do rio, por periodo ( temporario ) )
  QFMelhor : array [1..NumRios,1..Periodos] of real;
      ( vazoes finais do trecho do rio, por periodo ( melhores ) )
  CelMelhor : array [1..NumIrrig] of byte;
      ( melhores combinacoes de epoca de plantio )
  VMelhor : array [1..NumIrrig,1..Periodos] of real;
      ( vazoes por celula da melhor combinacao para aquele rio, por periodo )
  MelhorAlter : longint; ( Numero de ordem da melhor combinacao )
  soma : real; ( usado no calculo da media de vazoes na faixa especificada )
  QFMedio : real; ( media dos valores do vetor QFMelhor, na faixa especificada )
  Precipit : array [1..NumRios*NumIrrig,1..Periodos] of real;
  Dif : array [1..NumRios,1..Periodos] of real;

  ( Dif : Diferenca entre a vazao sem irrigacao e a com irrigacao )
  ( Q : Vazao sem irrigacao )
  ( Q - Dif : vazao com irrigacao )
  ( Se Dif >= Q entao o rio secou )

  DuracPer : array [1..periodos] of byte; ( duracao em dias de cada periodo )
  DiasRestantes : integer; ( Dias para completar o ciclo de uma cultura )
  PerIniVaz,
  PerFimVaz : byte; ( Periodo inicial para calculo da melhor vazao )

  Alternativa : longint; ( contador de alternativas calculadas )

  u,
  r,
  c,
  e,
      ( contador de culturas (1..NumCulturas) )
      ( contador de curso d'agua = numero do registro no disco )
      ( contador de celulas dentro de um curso d'agua )
      ( contador de todas as possiveis epocas de plantio no ano )

```

```

p      : byte; ( contador do periodo do ano (1..Periodos)           )
ArmAnt : real; ( Armazenamento de agua no solo no periodo anterior )

Hour,
Minute,
Second,
Sec100 : word;

(-----)
function LeadingZero(w : Word) : String;
var
  s : String;
begin
  Str(w:0,s);
  if Length(s) = 1 then
    s := '0' + s;
  LeadingZero := s;
end; ( LeadingZero )

(-----)
procedure Escrevelinha(n: byte);
var k: byte;
begin
  case n of
    1 : begin
      for k:= 1 to (periodos*6 + 9) do
        write(ArqResultVaz,'-');
        writeln(ArqResultVaz);
      end;

    2 : begin
      for k:= 1 to (NumIrrig*6 + 10) do
        write(ArqResultCel,'-');
        writeln(ArqResultCel);
      end;

    3 : begin
      for k:= 1 to (periodos*7 + 8) do
        write(ArqResultVazCel,'-');
        writeln(ArqResultVazCel);
      end;

  end; ( case )
end; ( Escrevelinha )

(----- Abertura de arquivos -----)
procedure Abrir_Arquivos;
begin
  assign(arqArvore, 'ARVORE.DFN' );
  assign(arqCultura, 'CULTURAS.DFN');
  assign(arqETP, 'ETP.DFN' );
  assign(arqFluvio, 'FLUVIO.DFN' );
  assign(arqKc, 'KC.DFN' );

```

```

assign(arqPrec, 'PREC.DFN' );
assign(arqPeriodo, 'PERIODOS.DFN');
assign(ArqResultVaz, 'RESULVAZ.DFN');
assign(ArqResultCel, 'RESULCEL.DFN');
assign(ArqResultVazCel, 'RESULVC.DFN');

reset(arqArvore );
reset(arqCultura);
reset(arqETP );
reset(arqFluvio );
reset(arqKc );
reset(arqPrec );
reset(arqPeriodo);
rewrite(ArqResultVaz);
rewrite(ArqResultCel);
rewrite(ArqResultVazCel);
end; ( Abrir_Arquivos )

(----- Fechamento de arquivos -----)
procedure Fechar_Arquivos;
begin
  close(arqArvore);
  close(arqCultura);
  close(arqETP);
  close(arqFluvio);
  close(arqKc);
  close(arqPrec);
  close(arqPeriodo);
  close(ArqResultVaz);
  close(ArqResultCel);
  close(ArqResultVazCel);
end; ( Fechar_Arquivos )

(----- Interpola a precipitacao conforme as coordenadas -----)
($I INTERPRE.PAS)

(----- Inicializacao de variaveis e vetores de dados -----)
procedure Inicializar_Variaveis;
var i,j,k : byte;
begin
  writeln('Iniciando leitura das variaveis. ');
  for i:= 1 to NumRios do
    for j:= 1 to Periodos do
      QFMeLhor[i,j]:= 1e38;
  readln(arqFluvio, AEst);
  for i:= 1 to Periodos do
  begin
    readln(arqETP, ETP[i]);           ( Lendo dados de ETP )
    readln(arqFluvio, QEst[i]);      ( Lendo dados de vazao da estacao )
  end;

  for i:= 1 to NumEstacoes do      ( Lendo dados de Precipitacao )
  begin
    read(arqPrec, Estacao[i].lat);

```

```

read(arqPrec,Estacao[i].long);
for j:= 1 to Periodos-1 do
  read(arqPrec,Estacao[i].Prec[j]);
readln(arqPrec,Estacao[i].Prec[Periodos]);
end;

for i:= 1 to NumCulturas do      ( Lendo dados de culturas )
  with culturas[i] do
    readln(arqCultura,NomeCult,PSRMax,MinPlant,MaxPlant)
  readln(arqKc);
for i:= 1 to NumCulturas do      ( Lendo dados de Kc e de comprimento )
begin                             ( de ciclo de cultura )
  for j:= 1 to Periodos do
  begin
    read(arqKc,Culturas[i].DurCiclo[j]);
    for k:= 1 to trunc((Culturas[i].DurCiclo[j] + (365/Periodos))/(365/Periodos)) do
      read(arqKc,Kc[i,j,k]);
    readln(arqKc);
  end;
  readln(arqKc); ( Le uma linha em branco para separar as culturas )
end;

for i:= 1 to NumRios do      ( Lendo dados dos cursos d'agua e celulas )
begin
  read(arqArvore,no);
  if MaxAvail > sizeof(nodo)
  then
  begin
    GetMem(Arvore[i],sizeof(nodo)); ( Aloca dinamicamente cada no da arvore )
    Arvore[i]^:= no;
  end
  else
  begin
    writeln('Nao h memoria suficiente para alocar mais um n! ');
    writeln('Memoria contigua disponivel = ',MaxAvail,' bytes. ');
    writeln('Programa abortado!');
    RunError(203); ( Heap Overflow Error )
  end;
end;

FillChar(VMelhor,sizeof(VMelhor),0);
FillChar(CelMelhor,sizeof(CelMelhor),0);

readln(arqPeriodo,PerIniVaz,PerFimVaz); ( lendo dados dos periodos do ano )
for p:= 1 to periodos do                ( 1 dado por linha )
  readln(arqperiodo,DuracPer[p]);

( Inicializando arquivos de resultados )

Escrevelinha(1);
writeln(ArqResultVaz,'Resultados da simulacao da bacia do Rio Verde Grande');
writeln(ArqResultVaz,'(Valores em m3/s)');
Escrevelinha(1);
write(ArqResultVaz,'Rio Comb. ');

```

```

for k:= 1 to Periodos do
  write(ArqResultVaz,' QF',k:2,' ');
writeln(ArqResultVaz);
Escrevelinha(1);

Escrevelinha(2);
writeln(ArqResultCel,'Resultados da simulacao da bacia do Rio Verde Grande');
writeln(ArqResultCel,'Epoacas do ano em que as celulas deverao ser plantadas');
Escrevelinha(2);
write(ArqResultCel,'Rio Comb. ');
for k:= 1 to NumIrrig do
  write(ArqResultCel,'Cel',k:2,' ');
writeln(ArqResultCel);
Escrevelinha(2);
Escrevelinha(3);
writeln(ArqResultVazCel,'Resultados da simulacao da bacia do Rio Verde Grande');
writeln(ArqResultVazCel,'Vazoes por celula (l/s) na melhor combinacao de plantio');
Escrevelinha(3);

writeln('Terminada leitura das variaveis. Nenhum erro encontrado. ');
writeln('Memoria disponivel = ',MemAvail,' bytes');
write('Inicializando o vetor de precipitacao... ');

          ( Inicializacao do vetor Precipit, para )
for i:= 1 to NumRios do ( evitar calculos constantes de InterPrec )
  for j:= 1 to arvore[i]^celulas do
    for k:= 1 to Periodos do
      begin
        Precipit[(i-1)*NumIrrig+j,k]:= InterPrec(k,arvore[i]^irrigantes[j].lat,
          arvore[i]^irrigantes[j].long);

        gotoxy(42,wherey);
        write((i-1)*NumIrrig+j);
      end;
      GetTime(Hour, Minute, Second, Sec100);
      Writeln('Hora Atual: ',LeadingZero(Hour),':',LeadingZero(Minute),':',LeadingZero(Second));
    end; ( Inicializar_Variaveis )

(----- Verifica se a epoca de plantio e' valida -----)
function PlantioValido(epoca, cult: byte): boolean;
begin
  with culturas[cult] do
    if MaxPlant > MinPlant
      then if (epoca >= MinPlant) and (epoca <= MaxPlant)
        then PlantioValido:= true
        else PlantioValido:= false
      else if (epoca >= MinPlant) or (epoca <= MaxPlant)
        then PlantioValido:= true
        else PlantioValido:= false;
end; ( PlantioValido )

(----- Calcula armazenamento de agua no solo -----)
function ARM (c,u: byte; ExcDef:real): real;
begin
  ARM:= ArmAnt;

```

```

ArmAnt:= ArmAnt - ExcDef;
if ArmAnt < 0
  then ArmAnt:= 0
  else if ArmAnt > (Arvore[r]^irrigantes[c].CRH * culturas[u].PSRMax)
    then ArmAnt:= Arvore[r]^irrigantes[c].CRH * culturas[u].PSRMax;
end; ( ARM )

(----- Calcula a vazao do rio naquele ponto sem irrigacao -----)
function Q(p,
           r : byte;
           abs: real): real;
  ( periodo do ano
  ( numero do trecho do curso d'agua
  ( abscissa para o calculo
var QI,
    qq,
    omega : real;
  ( vazao devida aos cursos d'agua anteriores
  ( vazao devida a contribuicao do lencol freatico
  ( vazao devida as chuvas
begin
  if (Arvore[r]^esq = 0) and (Arvore[r]^dir = 0)
    then QI:= 0
    else QI:= QFMelhor[Arvore[r]^esq,p] + QFMelhor[Arvore[r]^dir,p];

  qq:= QEst[p] * Arvore[r]^area/AEst * abs/Arvore[r]^compr ; (m3/s)

  omega:= Arvore[r]^Cd / Arvore[r]^compr * Arvore[r]^IPdA[p] * abs; ( m3/s)

  Q:= QI + qq + omega;
end; ( Q )

(----- Calculo em um curso d'agua -----)
procedure Calcule(arv: nodo; i: byte);
var FimCiclo : byte;
    ETR      : real;
    pcorr   : byte;
    ExcDef   : real;
    V       : array [1..NumIrrig,1..Periodos] of real;
begin
  r:= i;
  FillChar(Dif,sizeof(Dif),0);
  FillChar(QF,sizeof(QF),0);
  FillChar(V,sizeof(V),0);
  c:= 1;
  while c <= arv.celulas do
  begin
    u:= arv.irrigantes[c].cultura;
    case c of
      1 : e:= e1;
      2 : e:= e2;
      3 : e:= e3;
      4 : e:= e4;
      5 : e:= e5;
      6 : e:= e6;
      7 : e:= e7;
      8 : e:= e8;
      9 : e:= e9;
     10 : e:= e10;
    end
  end
end;

```

```

else writeln('Valor de c (' ,c,') invalido!');
end;
ArmAnt:= 0; ( Assume um teor de umidade inicial no solo igual a zero )
if PlantioValido(e, arv.irrigantes[c].cultura) then
begin
  DiasRestantes:= Culturas[u].DurCiclo[e];
  FimCiclo:= e + trunc((Culturas[u].DurCiclo[e]+(365/Periodos))/(365/Periodos)) - 1;
  for p:= e to FimCiclo do
  begin
    gotoxy(1,wherey);
    write('Processando n" # ',i,'; combinacao # ',Alternativa:8);
    if p > Periodos
      then pcorr:= p - Periodos
      else pcorr:= p;
    ETR:= Kc[u,e,p-e+1]*ETP[pcorr]; ( mm/periodo )
    if p = FimCiclo then ETR:= ETR*DiasRestantes/DuracPer[pcorr];
    ExcDef:= ETR - Precipit[(r-1)*NumIrrig+c,pcorr]; ( ExcDef > 0 -- deficit )
    VC[pcorr]:= 10 * (ExcDef - ARM(c,u,ExcDef)) *
      arv.irrigantes[c].area/arv.irrigantes[c].efic; ( m3/periodo )
    if VC[pcorr] < 0 then VC[pcorr]:= 0; ( Nao houve necessidade de irrigacao )
    if p <> FimCiclo
      then VC[pcorr]:= VC[pcorr]/(86400*DuracPer[pcorr])
          ( m3/s - considera a duracao )
          ( exata (em dias) de um periodo )
      else if DiasRestantes > 0 ( DiasRestantes < 0 neste ponto significa )
          ( um erro no processamento - verificar )
        then VC[pcorr]:= VC[pcorr]/(86400*DiasRestantes)
          ( idem, porem considera apenas o )
          ( restante do ciclo da cultura )
        else VC[pcorr]:= 0; ( pois o comprimento do periodo = 0 dias )
          ( para evitar erro divisao por zero )
    DiasRestantes:= DiasRestantes - DuracPer[pcorr];
    Dif[r,pcorr]:= Dif[r,pcorr] + VC[pcorr];
    if Q(pcorr,r,arv.irrigantes[c].abscissa) <= Dif[r,pcorr]
      then Dif[r,pcorr]:= Q(pcorr,r,arv.irrigantes[c].abscissa);
          ( rio secou naquele ponto )
  end;
end; ( Plantio Valido )
inc(c);
end; ( c )
soma:= 0;
for p:= 1 to Periodos do
begin
  Qf[r,p]:= Q(p,r,arv.compr) - Dif[r,p];
  if (p >= PerIniVaz) and (p <= PerFimVaz) then
    soma:= soma + Qf[r,p];
end;
if soma/(PerFimVaz - PerIniVaz + 1) < QFMedio
then begin ( combinacao melhor que a anterior )
  MelhorAlter:= Alternativa; ( Atualiza MelhorAlter )
  QFMedio:= soma/(PerFimVaz - PerIniVaz + 1); ( atualiza QFMedio )
          ( armazena melhor QF )
  for p:= 1 to periodos do
  begin

```

```

QFMelhor[r,p]:= QF[r,p];      ( armazena melhor QF      )

for c:= 1 to arv.celulas do  ( armazena melhores vazoes )
  VMelhor[c,p]:= VC[c,p];    ( por celula por periodo  )
end;

if arv.celulas >= 1 then CelMelhor[1]:= e1; ( armazena melhores )
if arv.celulas >= 2 then CelMelhor[2]:= e2; ( epocas de plantio )
if arv.celulas >= 3 then CelMelhor[3]:= e3;
if arv.celulas >= 4 then CelMelhor[4]:= e4;
if arv.celulas >= 5 then CelMelhor[5]:= e5;
if arv.celulas >= 6 then CelMelhor[6]:= e6;
if arv.celulas >= 7 then CelMelhor[7]:= e7;
if arv.celulas >= 8 then CelMelhor[8]:= e8;
if arv.celulas >= 9 then CelMelhor[9]:= e9;
if arv.celulas >= 10 then CelMelhor[10]:= e10;
end; ( combinacao melhor que a anterior )
inc(Alternativa);
end; ( Calcule )

(----- Determina todas as combinacoes possiveis naquele trecho de rio -----)
procedure Combine(arv : nodo; r: byte);
var k : byte;
begin
  QFMedio:= 1e38;      ( Inicializando a media do vetor      )
                      ( QFMelhor com o maior valor possivel )

                      ( Comb = Plant^Cel      )
  writeln;            ( Comb = n.o de combinacoes      )
  if arv.celulas >= 1 ( Cel = n.o de celulas      )
  then               ( Plant= n.o de epocas de plantio )
    for e1:= culturas[arv.irrigantes[1].cultura].MinPlant to
      culturas[arv.irrigantes[1].cultura].MaxPlant do
      if arv.celulas >= 2
      then
        for e2:= culturas[arv.irrigantes[2].cultura].MinPlant to
          culturas[arv.irrigantes[2].cultura].MaxPlant do
          if arv.celulas >= 3
          then
            for e3:= culturas[arv.irrigantes[3].cultura].MinPlant to
              culturas[arv.irrigantes[3].cultura].MaxPlant do
              if arv.celulas >= 4
              then
                for e4:= culturas[arv.irrigantes[4].cultura].MinPlant to
                  culturas[arv.irrigantes[4].cultura].MaxPlant do
                  if arv.celulas >= 5
                  then
                    for e5:= culturas[arv.irrigantes[5].cultura].MinPlant to
                      culturas[arv.irrigantes[5].cultura].MaxPlant do
                      if arv.celulas >= 6
                      then
                        for e6:= culturas[arv.irrigantes[6].cultura].MinPlant to
                          culturas[arv.irrigantes[6].cultura].MaxPlant do
                          if arv.celulas >= 7
                          then

```

```

for e7:= culturas[arv.irrigantes[7].cultura].MinPlant to
    culturas[arv.irrigantes[7].cultura].MaxPlant do
if arv.celulas )= 8
then
    for e8:= culturas[arv.irrigantes[8].cultura].MinPlant to
        culturas[arv.irrigantes[8].cultura].MaxPlant do
if arv.celulas )= 9
then
    for e9:= culturas[arv.irrigantes[9].cultura].MinPlant to
        culturas[arv.irrigantes[9].cultura].MaxPlant do
if arv.celulas )= 10
then
    for e10:= culturas[arv.irrigantes[10].cultura].MinPlant to
        culturas[arv.irrigantes[10].cultura].MaxPlant
do calcule(arv,r) ( 10 )
else calcule(arv,r) ( 9 )
else calcule(arv,r) ( 8 )
else calcule(arv,r) ( 7 )
else calcule(arv,r) ( 6 )
else calcule(arv,r) ( 5 )
else calcule(arv,r) ( 4 )
else calcule(arv,r) ( 3 )
else calcule(arv,r) ( 2 )
else calcule(arv,r) ( 1 )
else begin ( 0 )
    for p:= 1 to Periodos do
        QFMelhor[r,p]:= Q(p,r,arv.compr);
        MelhorAlter:= Alternativa;
        inc(Alternativa);
    end; ( 0 )

write(ArqResultVaz,arvore[r]^.codigo:6,MelhorAlter:7); {----- Formato do output: -----}
for p:= 1 to periodos do { Rio comb. QF1 QF2 QF3 ... }
    write(ArqResultVaz,QFMelhor[r,p]:7:3); { A121 127 0.124 0.133 0.114 ... }
writeln(ArqResultVaz); { A1211 334 0.245 0.337 0.290 ... }
{-----}

write(ArqResultCel,arvore[r]^.codigo:6,MelhorAlter:7); {----- Formato do output: -----}
for c:= 1 to arv.celulas do { Rio comb. Cel1 Cel2 Cel3 ... }
    write(ArqResultCel,CelMelhor[c]:6); { A121 127 4 7 5 ... }
writeln(ArqResultCel); { A1211 334 11 6 9 ... }
{-----}

writeln(ArqResultVazCel,'Rio = ',arvore[r]^.codigo,', ',arvore[r]^.nome,arvore[r]^.trecho);
writeln(ArqResultVazCel,'Melhor Combinacao = ',MelhorAlter);
write(ArqResultVazCel,'Celulas '); {----- Formato do output -----}
for p:= 1 to Periodos do { Rio = A121 Melhor Combinacao = 127 }
    write(ArqResultVazCel,p:4,', '); { Celulas 1 2 3 ... }
writeln(ArqResultVazCel); { ----- }
Escrevelinha(3); { Cel 1 5.72 3.52 2.61 ... }
for c:= 1 to arv.celulas do { Cel 2 12.44 11.72 10.15 ... }
begin {-----}
    write(ArqResultVazCel,'Cel',c:2,', ');
    for p:= 1 to Periodos do
        write(ArqResultVazCel,VMelhor[c,p]*1000:7:2); { transforma a vazao para l/s }
    writeln(ArqresultVazCel);

```

```

end;
Escrevelinha(3);
writeln(ArqresultVazCel);
end; ( combine )

(----- Caminhamento Pos-Ordem -----)
procedure Pos_ordem (arv : nodo;      ( registro do trecho de rio      )
                    ordem : byte);  ( # de ordem do registro no vetor )
begin
  if arv.esq (> 0) then pos_ordem(Arvore[arv.esq]^,arv.esq);
  if arv.dir (> 0) then pos_ordem(Arvore[arv.dir]^,arv.dir);
  combine(arv,ordem);
end; ( Pos_ordem )

(-----)

```

B.6.3 Arquivo "Interpre.Pas"

```

function InterPrec (período: byte; latitude,longitude: real): real;

(----- Declaracao das variaveis da funcao -----)

var
  menor1,
  menor2,
  menor3 : record
    est : byte;
    dist : real;
  end;
  i : byte;
  d1_, d2_,
  d1_pt, d2_pt,
  prec_pt1,
  prec_pt2,
  prec_pt3,
  n, n_,
  c, c_,
  long_,
  lat_,
  prec_,
  distancia : real;

begin ( InterPrec )

(----- Determinacao das estacoes mais proximas do ponto em questao -----)

  menor1.dist:= 1e10;
  menor2.dist:= 1e10;
  menor3.dist:= 1e10;
  for i:= 1 to NumEstacoes do

```

```

begin
  distancia:= sqrt( sqr(estacao[i].lat - latitude) + sqr(estacao[i].long - longitude) );
  if distancia < menor1.dist
    then begin
      menor3:= menor2;
      menor2:= menor1;
      menor1.dist:= distancia;
      menor1.est:= i;
    end
  else if distancia < menor2.dist
    then begin
      menor3:= menor2;
      menor2.dist:= distancia;
      menor2.est:= i;
    end
  else if distancia < menor3.dist
    then begin
      menor3.dist:= distancia;
      menor3.est:= i;
    end;
end;

(----- Interpolacao usando a reta menor1-ponto como linha base -----)

if longitude (<) estacao[menor1.est].long
then
begin
  m:= (latitude - estacao[menor1.est].lat)/(longitude - estacao[menor1.est].long);
  c:= latitude - m * longitude;
  if estacao[menor2.est].long (<) estacao[menor3.est].long
  then begin
    m_:= (estacao[menor2.est].lat - estacao[menor3.est].lat)/
      (estacao[menor2.est].long - estacao[menor3.est].long);
    c_:= estacao[menor2.est].lat - m_ * estacao[menor2.est].long;
  end;
  long_:= (c_ - c)/(m - m_);
  lat_:= m * long_ + c;
end
else begin
  long_:= longitude;
  m_:= (estacao[menor2.est].lat - estacao[menor3.est].lat)/
    (estacao[menor2.est].long - estacao[menor3.est].long);
  c_:= estacao[menor2.est].lat - m_ * estacao[menor2.est].long;
  lat_:= m_ * long_ + c_;
end;

d1_:= sqrt( sqr(estacao[menor2.est].lat - lat_) + sqr(estacao[menor2.est].long - long_) );
d2_:= sqrt( sqr(estacao[menor3.est].lat - lat_) + sqr(estacao[menor3.est].long - long_) );
prec_:= estacao[menor2.est].prec[periodo] + d1_ / (d1_ + d2_) *
  (estacao[menor3.est].prec[periodo] - estacao[menor2.est].prec[periodo]);

d1_pt:= sqrt( sqr(estacao[menor1.est].lat - latitude) + sqr(estacao[menor1.est].long - longitude) );
d2_pt:= sqrt( sqr(lat_ - latitude) + sqr(long_ - longitude) );
prec_pt1:= estacao[menor1.est].prec[periodo] + d1_pt/(d1_pt + d2_pt)*

```

```

        (prec_ - estacao[menor1.est].prec[periodo]);
if prec_pt1 < 0 then prec_pt1:= 0;

(----- Interpolacao usando a reta menor2-ponto como linha base -----)

m:= (latitude - estacao[menor2.est].lat)/(longitude - estacao[menor1.est].long);
c:= latitude - m * longitude;

m_:= (estacao[menor1.est].lat - estacao[menor3.est].lat)/
      (estacao[menor1.est].long - estacao[menor3.est].long);
c_:= estacao[menor1.est].lat - m_ * estacao[menor1.est].long;
long_:= (c_ - c)/(m - m_);
lat_:= m * long_ + c;
d1_:= sqrt( sqr(estacao[menor1.est].lat - lat_) + sqr(estacao[menor1.est].long - long_) );
d2_:= sqrt( sqr(estacao[menor3.est].lat - lat_) + sqr(estacao[menor3.est].long - long_) );
prec_:= estacao[menor1.est].prec[periodo] + d1_ / (d1_ + d2_) *
        (estacao[menor3.est].prec[periodo] - estacao[menor1.est].prec[periodo]);

d1_pt:= sqrt( sqr(estacao[menor2.est].lat - latitude)
              + sqr(estacao[menor2.est].long - longitude) );
d2_pt:= sqrt( sqr(lat_ - latitude) + sqr(long_ - longitude) );
prec_pt2:= estacao[menor1.est].prec[periodo] + d1_pt/(d1_pt + d2_pt)*
           (prec_ - estacao[menor2.est].prec[periodo]);
if prec_pt2 < 0 then prec_pt2:= 0;

(----- Interpolacao usando a reta menor3-ponto como linha base -----)

m:= (latitude - estacao[menor3.est].lat)/(longitude - estacao[menor3.est].long);
c:= latitude - m * longitude;

m_:= (estacao[menor2.est].lat - estacao[menor1.est].lat)/
      (estacao[menor2.est].long - estacao[menor1.est].long);
c_:= estacao[menor2.est].lat - m_ * estacao[menor2.est].long;

long_:= (c_ - c)/(m - m_);
lat_:= m * long_ + c;
d1_:= sqrt( sqr(estacao[menor2.est].lat - lat_) + sqr(estacao[menor2.est].long - long_) );
d2_:= sqrt( sqr(estacao[menor1.est].lat - lat_) + sqr(estacao[menor1.est].long - long_) );
prec_:= estacao[menor2.est].prec[periodo] + d1_ / (d1_ + d2_) *
        (estacao[menor1.est].prec[periodo] - estacao[menor2.est].prec[periodo]);

d1_pt:= sqrt( sqr(estacao[menor3.est].lat - latitude) +
              sqr(estacao[menor3.est].long - longitude) );
d2_pt:= sqrt( sqr(lat_ - latitude) + sqr(long_ - longitude) );
prec_pt3:= estacao[menor3.est].prec[periodo] + d1_pt/(d1_pt + d2_pt)*
           (prec_ - estacao[menor3.est].prec[periodo]);
if prec_pt3 < 0 then prec_pt3:= 0;

(----- calculo da media dos tres valores calculados anteriormente -----)

interprec:= (prec_pt1 + prec_pt2 + prec_pt3)/3;

end; ( InterPrec )

```

APÊNDICE C

QUADRO 1C - Relação dos Irrigantes na Área em Estudo

Irrigante	Cód.	Curso d'Água	Município	Área (ha)	Sistema	Absc. (km)	Cultura
João Damasio Filho	0-0	rio Verde Grande	M. Claros	43,0	Pivô	15,00	Algodão
João Damasio Filho	0-1	rio Verde Grande	M. Claros	98,0	Pivô	15,00	Feijão
João Damasio Filho	0-2	rio Verde Grande	M. Claros	94,0	Pivô	15,00	Feijão
João Damasio Filho	0-3	rio Verde Grande	M. Claros	55,0	Pivô	15,00	Feijão
Manoel Fagundes de Oliveira	0-4	rio Verde Grande	M. Claros	10,0	Convenc.	10,00	Feijão
Hernane Santiago Tribusi	0-5	rio Verde Grande	Cap Enéas	15,0	Convenc.	5,00	Feijão
José Joaquim de Queiroz	11-0	rio Canabrava	M. Claros	3,0	Superf.	20,10	Feijão
Virgilio Sá	11-1	rio Canabrava	M. Claros	10,0	Convenc.	16,08	Feijão
Fabio Lafetá Rebello	11-2	rio Canabrava	M. Claros	20,0	Inund.	12,06	Feijão
Fabio Lafetá Rebello	11-3	rio Canabrava	M. Claros	10,0	Convenc.	12,06	Milho
José Luiz de Freitas	11-4	rio Canabrava	M. Claros	4,0	Convenc.	8,04	Feijão
Ildeu Souto	11-5	rio Canabrava	M. Claros	8,0	Convenc.	4,02	Feijão
Antônio Cesar Athaide	121-0	rio Verde Grande	Franc. Sá	20,0	Superf.	6,83	Milho
Rosentalo Caldeira Veloso	121-1	rio Verde Grande	Franc. Sá	10,0	Convenc.	4,55	Milho
Roberto Lafetá Rebello	121-2	rio Verde Grande	M. Claros	12,0	Convenc.	2,28	Feijão
Ivan Soares dos Santos	1211-0	rio Tábua	M. Claros	2,0	Convenc.	24,30	Feijão
Ana Sarmento	1211-1	rio Tábua	M. Claros	2,0	Convenc.	20,25	Feijão
Antônio Augusto Soares	1211-2	rio Tábua	M. Claros	4,6	Convenc.	16,20	Algodão
Lourival Soares Pereira	1211-3	rio Tábua	M. Claros	3,0	Convenc.	12,15	Feijão
Waldir Luiz da Silva	1211-4	rio Tábua	M. Claros	3,0	Convenc.	8,10	Feijão
Grupo De Produtores Cabeceira	1211-5	rio Tábua	M. Claros	15,0	Superf.	4,05	Feijão
Renato Andrade	A11-0	rio das Canoas	M. Claros	15,0	Convenc.	8,75	Feijão
Waldemar Caldeira Veloso	A12-0	córrego do Vieira	M. Claros	4,5	Convenc.	21,27	Feijão
Antônio Augusto Tupinambá	A12-1	córrego do Vieira	M. Claros	18,0	Autoprop.	14,18	Algodão
Antônio Augusto Tupinambá	A12-2	córrego do Vieira	M. Claros	7,0	Superf.	14,18	Algodão
Ricardo Veloso	A12-3	córrego do Vieira	M. Claros	3,0	Superf.	7,09	Feijão
Humberto Souto Guimarães	A2-0	rio Verde Grande	M. Claros	17,0	Convenc.	21,00	Feijão
João Luiz Silva	A2-1	rio Verde Grande	M. Claros	7,0	Superf.	17,50	Feijão
José Nave Dias dos Santos	A2-2	rio Verde Grande	M. Claros	20,0	Autoprop.	14,00	Feijão
Lasio Carvalho de Oliveira	A2-3	rio Verde Grande	M. Claros	12,0	Convenc.	10,50	Feijão
Lourival Soares Caldeira	A2-4	rio Verde Grande	M. Claros	8,0	Convenc.	7,00	Milho
Florentino Soares Fonseca	A2-5	rio Verde Grande	M. Claros	10,0	Convenc.	3,50	Feijão
José Brant Maia	A21-0	rio Verde Grande	Juramento	12,0	Convenc.	4,38	Feijão
Josino Alves Pinheiro	A211-0	rio Mimoso	M. Claros	5,0	Convenc.	10,24	Feijão
Francisco Pinheiro	A211-1	rio Mimoso	M. Claros	3,0	Convenc.	6,83	Milho
Lourival	A211-2	rio Mimoso	M. Claros	3,0	Convenc.	3,41	Milho
Luis Antônio	B11-0	rio do Peixe	M. Claros	10,0	Convenc.	7,70	Algodão
Euler Veloso Nery	B12-0	rio Verde Grande	Bocaiúva	3,0	Convenc.	4,67	Feijão
José Ribeiro Zuba	B12-1	rio Verde Grande	M. Claros	5,0	Convenc.	3,73	Feijão
Luiz Antônio	B12-2	rio Verde Grande	M. Claros	20,0	Autoprop.	2,80	Feijão
Antônio Balisa	B12-3	rio Verde Grande	Bocaiúva	17,0	Convenc.	1,87	Algodão
Geraldo da Costa Zuba	B12-4	rio Verde Grande	Bocaiúva	2,0	Convenc.	0,93	Feijão
Haroldo Filpi	B121-0	rio do Sítio	Bocaiúva	15,0	Convenc.	13,20	Feijão

(Continua...)

QUADRO 1C - Relação dos Irrigantes na Área em Estudo (Cont.)

Irrigante	Cód.	Curso d'Água	Município	Área (ha)	Sistema	Absc. (km)	Cultura
José Messias Castro de Brito	B121-1	rio do Sítio	Bocaiúva	16,0	Convenc.	11,00	Feijão
José Messias Castro de Brito	B121-2	rio do Sítio	M. Claros	6,0	Convenc.	8,80	Algodão
Edson Santos Costa	B121-3	rio do Sítio	Bocaiúva	12,0	Convenc.	6,60	Algodão
Antônio Carlos Moura Cardoso	B121-4	rio do Sítio	M. Claros	12,0	Convenc.	4,40	Feijão
Xisto Pereira da Cruz Filho	B121-5	rio do Sítio	Bocaiúva	9,0	Convenc.	2,20	Feijão
Xisto Pereira da Cruz Filho	B122-0	rio Verde Grande	Bocaiúva	5,0	Convenc.	6,07	Feijão
Derico	B122-1	rio Verde Grande	Bocaiúva	8,0	Convenc.	3,03	Algodão
Antônio Paulo de Souza	B211-0	rio do Felix	Bocaiúva	2,0	Convenc.	7,35	Feijão
Antônio Brant Maia	B212-0	rio das Pedras	Juramento	4,0	Convenc.	10,80	Feijão
José Goncalves da Silva	B212-1	rio das Pedras	Juramento	3,0	Convenc.	9,00	Feijão
Manoel Alves da Conceição	B212-2	rio das Pedras	Bocaiúva	6,0	Convenc.	7,20	Feijão
Francisco de Assis Freitas	B212-3	rio das Pedras	Bocaiúva	3,0	Convenc.	5,40	Algodão
Aristides Teixeira Tiago	B212-4	rio das Pedras	Bocaiúva	4,0	Convenc.	3,60	Feijão
Adgar Vicente Siqueira	B212-5	rio das Pedras	Bocaiúva	3,0	Convenc.	1,80	Feijão
Miguel Ramiro da Silva	B22-0	rio Caiçara	Juramento	4,0	Convenc.	10,08	Feijão
Benvindo da Silva Primo	B22-1	rio Caiçara	Juramento	5,0	Convenc.	7,56	Algodão
Antônio Ribeiro Maia	B22-2	rio Caiçara	Juramento	3,0	Convenc.	5,04	Milho
Gasparino Jacinto de Souza	B22-3	rio Caiçara	Juramento	2,0	Convenc.	2,52	Feijão
Luiz Maia	A22-0	rio Juramento	Juramento	18,0	Inund.	8,10	Milho
João Veloso	A22-1	rio Juramento	Juramento	2,5	Superf.	6,75	Milho
José Alves Prates	A22-2	rio Juramento	Juramento	7,0	Convenc.	5,40	Feijão
Dimas Lessa	A22-3	rio Juramento	Juramento	12,0	Convenc.	4,05	Feijão
Geraldo Marcos Alves	A22-4	rio Juramento	Juramento	5,0	Superf.	2,70	Algodão
Mario Braga Batista	A22-5	rio Juramento	Juramento	6,0	Superf.	1,35	Algodão
Santa Cruz Agropecuária	A221-0	rio Juramento	Juramento	44,0	Autoprop.	8,14	Feijão
Antônio Rodrigues Maia	A221-1	rio Juramento	Juramento	3,0	Convenc.	5,43	Milho
Olimpio Maia	A221-2	rio Juramento	Juramento	18,0	Inund.	2,71	Milho
João Leao Coelho	A2211-0	córrego Encantado	Juramento	4,5	Convenc.	7,47	Feijão
Luiz Xavier da Fonseca	A2211-1	córrego Encantado	Juramento	10,0	Convenc.	3,73	Algodão
Gregorio Rodrigues de Souza	A222-0	rio Saracura	Juramento	15,0	Convenc.	10,68	Algodão
Mauricio Dias da Silva	122-0	rio Caititu	Franc. Sá	4,5	Superf.	23,70	Feijão
Marcelo Alves Paixão	122-1	rio Caititu	Franc. Sá	6,0	Convenc.	19,75	Algodão
Antônio Balbino	122-2	rio Caititu	Franc. Sá	3,0	Convenc.	15,80	Milho
Osmara Barbosa	122-3	rio Caititu	Franc. Sá	4,0	Convenc.	11,85	Feijão
Vilo Brant	122-4	rio Caititu	Franc. Sá	4,0	Convenc.	7,90	Feijão
Maximiano Alves Cardoso	122-5	rio Caititu	Franc. Sá	16,0	Autoprop.	3,95	Feijão
Bernardo Ataíde Kalfmann	1221-0	rio Caititu	Franc. Sá	16,0	Convenc.	25,48	Algodão
Ari Lellis Vieira	1221-1	rio Caititu	Franc. Sá	17,0	Convenc.	19,11	Feijão
João Wanderbak Quadros	1221-2	rio Caititu	Franc. Sá	15,0	Convenc.	12,74	Feijão
Manoel Higino Cardoso	1221-3	rio Caititu	Franc. Sá	2,0	Convenc.	6,37	Milho
Ricardo Silva Dias	1222-0	rio Boa Vista	Franc. Sá	2,0	Convenc.	8,88	Milho
Ricardo Silva Dias	1222-1	rio Boa Vista	Franc. Sá	1,5	Superf.	4,44	Milho
Alfredo Ramiro Dias da Rocha	1222-2	rio Boa Vista	Franc. Sá	3,0	Convenc.	4,44	Feijão
João Batista Lourenço	2-0	rio São Domingos	Franc. Sá	7,0	Convenc.	34,50	Algodão
João Nungi de Carvalho	2-1	rio São Domingos	Franc. Sá	6,0	Convenc.	28,75	Algodão
Mussio Assão	2-2	rio São Domingos	Franc. Sá	26,0	Autoprop.	23,00	Feijão
Terezinha Ribeiro	2-3	rio São Domingos	Franc. Sá	5,0	Convenc.	17,25	Feijão
Geraldo Afonso Xavier	2-4	rio São Domingos	Franc. Sá	7,0	Convenc.	11,50	Algodão
João Evangelista Xavier	2-5	rio São Domingos	Franc. Sá	6,0	Convenc.	5,75	Feijão

APÊNDICE D

QUADRO 1D - Valores do Coeficiente k_{rp} , em $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Código	k											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	0,266	0,274	0,252	0,241	0,226	0,232	0,229	0,216	0,216	0,220	0,227	0,302
1	0,028	0,028	0,026	0,025	0,023	0,024	0,024	0,022	0,022	0,023	0,023	0,031
11	0,099	0,102	0,094	0,090	0,084	0,086	0,085	0,080	0,080	0,082	0,084	0,112
12	0,033	0,034	0,031	0,030	0,028	0,029	0,029	0,027	0,027	0,027	0,028	0,038
121	0,058	0,060	0,055	0,053	0,049	0,051	0,050	0,047	0,047	0,048	0,050	0,066
1211	0,103	0,106	0,098	0,094	0,088	0,090	0,089	0,084	0,084	0,085	0,088	0,117
1212A	0,168	0,173	0,159	0,152	0,143	0,146	0,145	0,137	0,137	0,139	0,143	0,191
A1	0,050	0,051	0,047	0,045	0,042	0,043	0,043	0,040	0,040	0,041	0,042	0,056
A11	0,089	0,092	0,084	0,081	0,076	0,078	0,077	0,072	0,072	0,074	0,076	0,101
A12	0,240	0,247	0,227	0,217	0,203	0,208	0,206	0,194	0,194	0,198	0,204	0,272
A2	0,263	0,271	0,249	0,238	0,223	0,229	0,226	0,213	0,213	0,218	0,224	0,298
A21	0,094	0,097	0,089	0,085	0,080	0,082	0,081	0,076	0,076	0,078	0,080	0,107
A211	0,058	0,060	0,055	0,053	0,050	0,051	0,050	0,047	0,047	0,048	0,050	0,066
A212B	0,008	0,009	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,009
B1	0,011	0,011	0,010	0,010	0,009	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,013
B11	0,059	0,061	0,056	0,053	0,050	0,051	0,051	0,048	0,048	0,049	0,050	0,067
B12	0,055	0,057	0,052	0,050	0,047	0,048	0,048	0,045	0,045	0,046	0,047	0,063
B121	0,111	0,115	0,105	0,101	0,094	0,097	0,096	0,090	0,090	0,092	0,095	0,126
B122	0,160	0,165	0,151	0,145	0,136	0,139	0,138	0,130	0,130	0,133	0,136	0,182
B2	0,173	0,178	0,164	0,157	0,147	0,150	0,149	0,140	0,140	0,143	0,147	0,196
B21	0,043	0,045	0,041	0,039	0,037	0,038	0,037	0,035	0,035	0,036	0,037	0,049
B211	0,082	0,085	0,078	0,075	0,070	0,072	0,071	0,067	0,067	0,068	0,070	0,094
B212	0,090	0,093	0,085	0,082	0,076	0,078	0,078	0,073	0,073	0,075	0,077	0,102
B22	0,095	0,098	0,090	0,086	0,081	0,083	0,082	0,077	0,077	0,079	0,081	0,108
A22	0,142	0,147	0,135	0,129	0,121	0,124	0,123	0,116	0,116	0,118	0,121	0,162
A221	0,064	0,066	0,061	0,058	0,055	0,056	0,055	0,052	0,052	0,053	0,055	0,073
A2211	0,044	0,045	0,041	0,040	0,037	0,038	0,038	0,036	0,036	0,036	0,037	0,050
A2212	0,058	0,060	0,055	0,053	0,050	0,051	0,050	0,047	0,047	0,048	0,050	0,066
A222	0,091	0,094	0,086	0,083	0,078	0,079	0,079	0,074	0,074	0,076	0,078	0,104
122	0,161	0,165	0,152	0,145	0,136	0,140	0,138	0,130	0,130	0,133	0,137	0,182
1221	0,099	0,102	0,094	0,090	0,084	0,086	0,086	0,081	0,081	0,082	0,085	0,113
1222	0,128	0,132	0,121	0,116	0,108	0,111	0,110	0,104	0,104	0,106	0,109	0,145
2	0,153	0,158	0,145	0,139	0,130	0,133	0,132	0,124	0,124	0,127	0,131	0,174

QUADRO 2D - Valores do Coeficiente K_{rp} , em $10^{-3} m^2.s^{-1}$

Código	K											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	0,027	0,008	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,100	0,049
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,038	0,011	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,034	0,138	0,067
12	0,017	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,064	0,031
121	0,023	0,007	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,086	0,042
1211	0,040	0,011	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,146	0,071
1212A	0,064	0,018	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,058	0,234	0,114
A1	0,017	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,062	0,030
A11	0,034	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,125	0,061
A12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
A2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
A21	0,035	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,128	0,063
A211	0,020	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,073	0,035
A212B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
B1	0,010	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,038	0,018
B11	0,021	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019	0,076	0,037
B12	0,017	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,061	0,030
B121	0,043	0,012	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,158	0,077
B122	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,009	0,004
B2	0,024	0,007	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,090	0,044
B21	0,015	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,055	0,027
B211	0,030	0,008	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,108	0,053
B212	0,034	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,124	0,061
B22	0,036	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,131	0,064
A22	0,017	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,061	0,030
A221	0,022	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,079	0,039
A2211	0,017	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,061	0,030
A2212	0,023	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,083	0,041
A222	0,036	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,131	0,064
122	0,034	0,010	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,125	0,061
1221	0,009	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,033	0,016
1222	0,049	0,014	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	0,179	0,087
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000

APÊNDICE E

QUADRO 1E - Cálculo do Tempo de Processamento do Programa de Simulação (CPU 8088 a 12 MHz)

Código	Épocas de Plantio (E)	Irrigantes (I)	Combinações E ^I	Tempo (hh:mm:ss)
0	5	6	15625	01:09:32
1	5	0	1	00:00:00
11	5	6	15625	01:09:32
12	5	0	1	00:00:00
121	5	3	125	00:01:33
1211	5	6	15625	01:09:32
1212A	5	0	1	00:00:00
A1	5	0	1	00:00:00
A11	5	1	5	00:00:01
A12	5	4	625	00:03:44
A2	5	6	15625	01:09:32
A21	5	1	5	00:00:01
A211	5	3	125	00:01:33
A212B	5	0	1	00:00:00
B1	5	0	1	00:00:00
B11	5	1	5	00:00:01
B12	5	5	3125	00:14:42
B121	5	6	15625	01:09:32
B122	5	2	25	00:00:07
B2	5	0	1	00:00:00
B21	5	0	1	00:00:00
B211	5	1	5	00:00:01
B212	5	6	15625	01:09:32
B22	5	4	625	00:03:44
A22	5	6	15625	01:09:32
A221	5	3	125	00:01:33
A2211	5	2	25	00:00:07
A2212	5	0	1	00:00:00
A222	5	1	5	00:00:01
122	5	6	15625	01:09:32
1221	5	4	625	00:03:44
1222	5	3	125	00:01:33
2	5	6	15625	01:09:32
Total			146209	11:41:16