

# Análise da dinâmica do talude erosivo de um sistema em voçorocamento: causas e processos

## Analysis of the sidewall dynamics of a gully system: causes and processes

Estêvão Botura Stefanuto\*, Cenira Maria Lupinacci\*\*

\* Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista – Campus de Rio Claro, [estevao.stefanuto@unesp.br](mailto:estevao.stefanuto@unesp.br)

\*\* Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental, Universidade Estadual Paulista – Campus de Rio Claro, [cenira.lupinacci@unesp.br](mailto:cenira.lupinacci@unesp.br)

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v58i0.91246>

---

### Resumo

Globalmente, as voçorocas se evidenciam como um fenômeno altamente complexo devido a sua condição multicausal e não coincidente, apresentando variações em suas dimensões temporais e espaciais. Neste sentido, tem-se como objetivo avaliar a dinâmica evolutiva do talude erosivo de um sistema em voçorocamento, visando compreender sua interação com os eventos pluviométricos, assim como os mecanismos de dinamização atuantes. Para tal, selecionou-se um sistema em voçorocamento com morfologia diferenciada, apresentando talude erosivo organizado em dois patamares, localizado na Depressão Periférica Paulista, no município de Corumbataí (SP). Os taludes erosivos foram monitorados a partir de estacas instaladas em seu entorno, durante o período de 11 trimestres. Desta forma, verificou-se que duas dinâmicas evolutivas atuam no talude erosivo, sendo estas a perda de material, associada ao solapamento da base, erosão por quedas d'água e atuação do canal hídrico; e a expansão do material, relacionada a processos de solapamento em curso, a expansão dos materiais por hidratação e a ocupação dos pontos de leitura por gramíneas. Também se averiguou que a presença de gado pode ter contribuído para maior dinâmica do talude, uma vez que grande parte dos períodos de monitoramento, posteriores a retirada do gado, apresentaram redução nos valores de perda de material. Por fim, as chuvas também se apresentam como uma variável importante para a análise, sendo que parte dos trimestres evidenciaram consonância entre aumento do volume pluviométrico e aumento da perda de material e parte evidencia relação inversa entre chuva e perda de material, a qual pode estar associada às chuvas poucas intensas e a umidade antecedente.

### Palavras-chave:

Voçoroca, Monitoramento erosivo, Perda e expansão de material, Intensidade de chuva.

### Abstract

Globally, gullies appear to be a complex phenomenon due to their multi-causal and non-coincidental condition, with variations in their temporal and spatial dimensions. In this sense, the aim is to evaluate the evolutionary dynamics of the sidewall gullies system, aiming to understand

---

its interaction with rainfall events, as well as the active dynamization mechanisms. For this, was selected a gully system with differentiated morphology, presenting a sidewall organized in two levels, located in the Paulista Peripheral Depression, in the Corumbataí city from São Paulo. The sidewall was monitored from stakes installed around them, over the 11 quarter period. In this way, it was verified that two evolutionary dynamics act on the sidewall, namely the loss of material, associated with the undermined blocks, erosion by waterfalls and the action of the water channel; and the expansion of the material, related to undermined blocks processes in progress, the expansion of the materials by hydration and the occupation of the reading points by grasses. It was also found that the presence of cattle may have contributed to greater sidewall dynamics, since most of the monitoring periods, after the removal of the cattle, showed a reduction in the values of material loss. Finally, rainfall is also a variable of interest, with part of the analyzed quarters showing consonance between increased rainfall and increased material loss, and part showing an inverse relationship between rain and material loss, which may be associated to the little intense rains and the antecedent wet.

**Keywords:**

Gully erosion, Erosion monitoring, Material loss and expansion, Rainfall intensity

---

**I. INTRODUÇÃO**

Globalmente, as voçorocas se evidenciam como um fenômeno altamente complexo devido a sua condição multicausal e não coincidente, apresentando variações em suas dimensões temporais e espaciais, fatores os quais exigem uma série de metodologias para medição, monitoramento e análise (CASTILLO; GOMÉZ, 2016). Neste contexto questiona-se: qual a contribuição das voçorocas para a perda geral dos solos e produção de sedimentos em variadas escalas temporais e espaciais e sob diferentes condições climáticas e usos da terra? As respostas de tal fenômeno erosivo são amplas e reforçam o atributo complexo. Por exemplo, Poesen *et al.* (2003), ao analisar a produção de sedimentos a partir da erosão hídrica em diferentes partes do mundo, constataram que as voçorocas podem contribuir com 10% a 94% do total de sedimentos oriundos desse processo erosivo. Vale destacar também que estudos que consideram as voçorocas como objeto de análise datam do início do século XX (RUBEY, 1928), fato que garante aproximadamente 100 anos de pesquisas sobre o tema, proporcionando uma gama de teorias e metodologias sobre a ocorrência e evolução de voçorocas.

Algumas pesquisas estreitam a relação de ocorrência e evolução desta feição com o uso e a cobertura da terra, destacando a retirada de vegetação nativa e a conversão dos terrenos em áreas agrícolas como fator determinante (TEBEBU *et al.* 2010). Práticas rurais, como a pecuária, quando desempenhadas de forma contínua e excessiva, atuam como um elemento forçante, ocasionando a perversão de atributos físicos do

---

terreno e acelerando a dinâmica de processos erosivos, podendo originar as voçorocas (ZANATTA *et al.*, 2019). Setores de sobrepastoreio antigos (150 anos) podem ainda se associar a estradas e a rotas de passagem (BOARDMAN, 2014), situação que intensifica a degradação do solo, ocasionando caminhos preferenciais para os fluxos superficiais. Estradas rurais (sem pavimentação) localizadas no limite entre áreas de plantio (cana-de-açúcar) e fragmentos de mata, podem apresentar recorrência de voçorocas permanentes. Tais feições erosivas, em sua maioria, se iniciam nas próprias estradas ou em suas margens inferiores (considerando o sentido de caimento da vertente) e adentram aos setores de mata (BEZERRA *et al.*, 2020). Ainda, buscando especificar a análise, cabe atenção aos pontos de intersecção entre estradas e terraços agrícolas, pois, de acordo com Bezerra *et al.* (2020), em pesquisa aplicada às bacias hidrográficas afluentes do córrego Barro Frio (Piracicaba - SP), ao longo de 104 interseções, 38 destas (37%) são coincidentes com feições erosivas. Nestes setores, o fluxo concentrado proveniente do volume de água acumulado ao longo da calha do terraço agrícola, contribui, a partir do extravasamento e escoamento pelas laterais, para formação de feições erosivas como as voçorocas.

Assim, em áreas degradadas, o escoamento superficial se evidencia consideravelmente superior em relação a setores, por exemplo, bem vegetados. Com isso, perante eventos pluviométricos com volumes elevados (ex. 100 mm), fluxos significativos são identificados no canal das voçorocas (BOARDMAN, 2014), apresentando alto potencial para dinamizar a evolução dos taludes erosivos. Desta forma, analisar a relação entre chuva e voçorocas constitui-se em um elemento de importância, sendo possível categorizar a ação das chuvas em eventos únicos e eventos múltiplos ou estendidos (ANDERSON *et al.*, 2021). Os eventos únicos são associados a chuvas de alta intensidade, as quais apresentam volume de água elevado em um curto período. Durante esses eventos cabe atenção aos fluxos concentrados, que dinamizam a evolução da voçoroca (ANDERSON *et al.*, 2021) a partir de processos como a retirada de material do sopé do talude erosivo (formação das alcovas), proporcionando um ambiente propício ao fendilhamento e solapamento do material (WELLS *et al.*, 2013), sendo este último processo representado por quedas de blocos por cisalhamento (*shearing failure*), tombamento (*toppling failure*) e/ou stress (*stress failure*) (WANG *et al.*, 2016). Já eventos múltiplos podem afetar voçorocas de maneiras possivelmente mais profundas do que eventos únicos curtos (ANDERSON *et al.*, 2021). De acordo com Karimov *et al.* (2015), em estudo aplicado à área agrícola, as voçorocas apresentam evolução da cabeceira significativa quando são registrados eventos pluviométricos em solos saturados por chuvas antecedentes. Wells *et al.* (2013) destaca que, se os solos dos taludes estiverem encharcados, ocorre um aumento no peso do material e a partir da atuação da erosão no sopé do talude, o

mesmo pode desmoronar de maneira proeminente. Já outros autores destacam o período seco, chamando a atenção para solos argilosos, nos quais pode ocorrer a formação de gretas e fendas de ressecamento que podem facilitar a evolução erosiva do talude nas primeiras chuvas do período úmido (MENDES, 1993).

Assim, apesar das voçorocas constituírem-se um objeto de pesquisa com anos de análise (RUBEY, 1928), *gaps* científicos ainda persistem, necessitando de novas pesquisas. Com isso, Castillo e Gómez (2016) apontam para a necessidade de mais estudos fornecerem dados de longo prazo e com alta frequência de levantamentos, assim aumentando a confiabilidade, já que os dados tendem a ser amplamente variáveis. Já Dube *et al.* (2020) afirmam que dados recorrentes na bibliografia sobre voçorocas ainda precisam de ajustes e aprofundamentos, como os impactos do clima, a topografia, o uso da terra e/ou mudança de uso da terra e a mineralogia dos solos. Ainda, os autores destacam a necessidade de mais informações sobre as estações secas, abordando sua duração e as quantidades máximas de chuva e/ou sua intensidade.

Portanto, tem-se como objetivo deste artigo avaliar a dinâmica evolutiva do talude erosivo de um sistema em voçorocamento, visando compreender sua interação com os eventos pluviométricos, assim como os mecanismos de dinamização atuantes. Tal sistema em voçorocamento apresenta morfologia diferenciada, com o talude erosivo organizado em dois patamares, estando apenas o patamar inferior em contato com o curso hídrico, fato que, a princípio, pode destacar as condições multicausais e não coincidentes (CASTILLO; GOMÉZ, 2016). Destaca-se ainda que no decorrer do monitoramento erosivo a área apresentou períodos com gado e períodos sem gado, permitindo uma análise mais precisa da influência da pecuária em sistemas em voçorocamento.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se a seguir a área de estudo e a técnica de monitoramento de campo utilizada para mensuração da dinâmica erosiva do talude erosivo da voçoroca, assim como a coleta e organização dos dados secundários de chuva.

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no setor leste da Bacia Sedimentar do Paraná na província da Depressão Periférica, mais especificamente na Zona do Médio Tietê (Figura 1). Tal zona é constituída principalmente por rochas sedimentares, com expressivas intrusões de rochas basálticas. A inclinação das camadas sedimentares destaca rochas mais resistentes, ocorrendo ainda zonas elevadas no relevo fruto de intrusões basálticas. As

demais formas são bastante suaves, com desníveis locais que raramente ultrapassam 200 metros. Caracteriza-se, segundo IPT (1981), como Relevo de Morrotes, o qual apresenta interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos e achatados e vertentes ravinadas com perfis retilíneos (IPT, 1981, p.58). Aloca-se sobre a Formação Piramboia (IG, 1984), a qual se encontra sobreposta aos folhelhos e siltitos da Formação Corumbataí e sotoposta aos arenitos da Formação Botucatu, com ambos os contatos discordantes (CORTÊS; PERINOTTO, 2015). Já os solos são predominantemente caracterizados por Argissolos Vermelho Amarelo Distrófico, da unidade Serrinha (KOFFLER *et al.*,1992), os quais apresentam mudança textural abrupta caracterizada por um horizonte B textural. Em superfície ocorre um domínio de areia de granulometria fina (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Em relação à morfometria, a sub-bacia apresenta, majoritariamente, declividade de 5% a 12%, evidenciando a montante do sistema erosivo classe de declividade de 12-30% (SILVA; LUPINACCI, 2021). No que se refere à energia do relevo, a sub-bacia têm predominância de energia média e medianamente forte, sendo as porções a montante do sistema com classe de energia classificada como forte (SILVA; LUPINACCI, 2021).

No que tange a dinâmica pluviométrica, o mês de janeiro constitui-se no mais chuvoso e agosto no mês mais seco. Em uma análise histórica (1983 a 2012) o ano de 1983 apresenta o maior volume pluviométrico registrado (2.299,3 mm), sendo o ano de 2003 o com menor volume (1.232,5 mm; Figura 2. No período, os meses de janeiro e de fevereiro apresentam os volumes máximos registrados, com 600,7 mm precipitados em janeiro de 1999 e 618,8 mm em fevereiro de 1995 (MELLO, 2014, p.40-42).

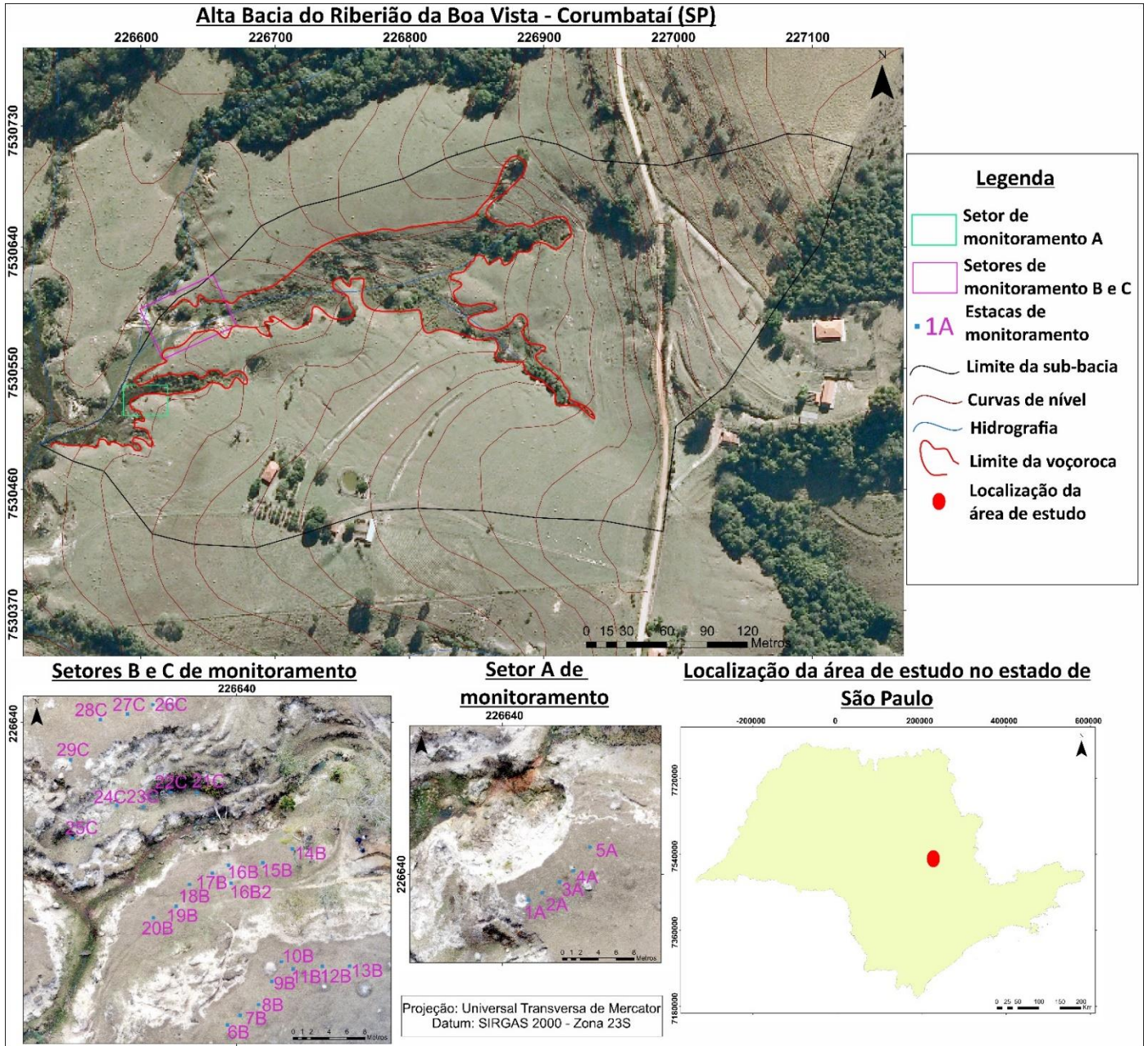


Figura 1 - Identificação da área de estudo. Fonte imagem da alta bacia: EMPLASA (2010). Fonte base cartográfica: IGCS (1979).

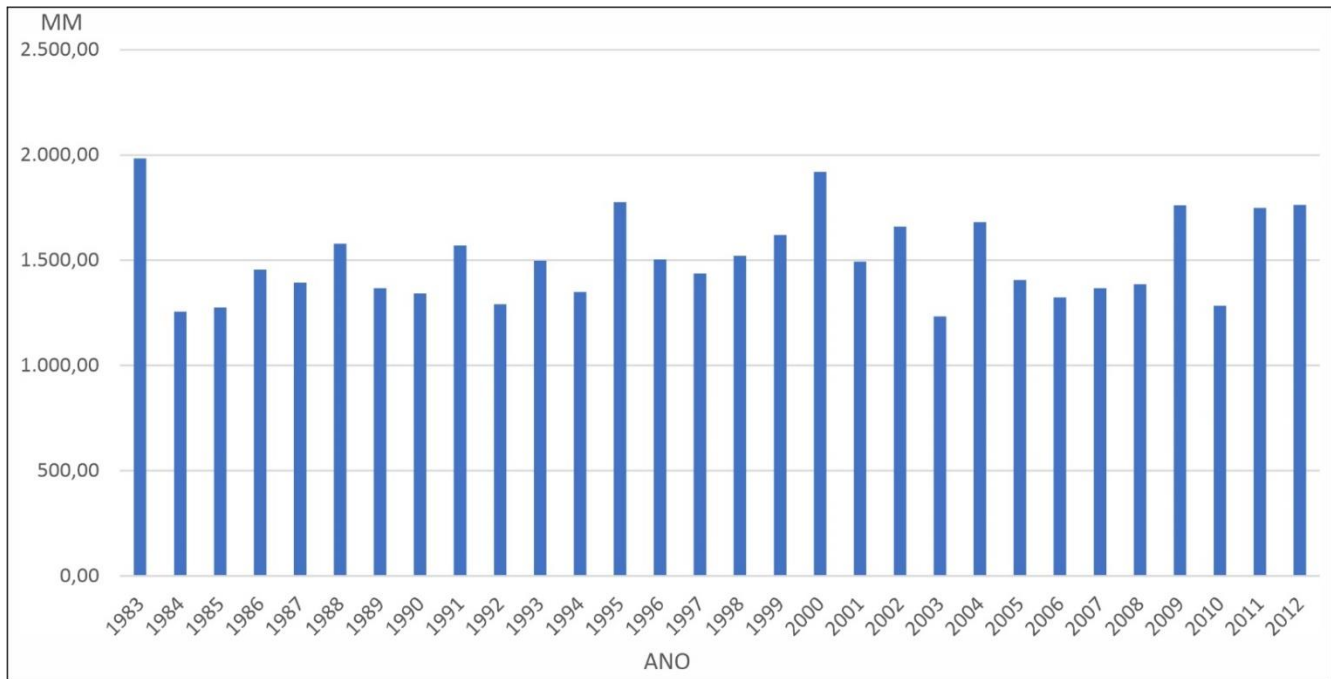


Figura 2 – Série histórica da precipitação anual em Corumbataí (SP) – 1983 a 2012 Fonte: Mello (2014)

## MONITORAMENTO DO TALUDE EROSIVO

Os taludes erosivos do sistema em voçorocamento analisado foram monitorados a partir da proposta de Guerra (2002), a qual indica a mensuração da evolução de feições a partir de estacas instaladas em seu entorno. Para esta pesquisa, algumas adaptações foram necessárias, visando atribuir maior precisão à técnica. As estacas foram instaladas em Corumbataí em 07 de maio de 2020, sendo o último monitoramento realizado em 08 de fevereiro de 2023. A frequência de monitoramento foi trimestral, visando abarcar a interação do talude erosivo com as estações secas e úmidas e suas respectivas transições.

Ao todo foram instaladas 29 estacas. Pela área apresentar um complexo e extenso sistema de voçorocamento, selecionaram-se alguns setores para o monitoramento, tendo como critério o grau de dinamicidade do talude erosivo, representado por blocos solapados e taludes desnudos. Foram selecionados três setores localizados no médio curso do sistema erosivo, sendo os mesmos classificados em “A, B e C” (Figura 1). Ainda, aos setores B e C foram atribuídas as designações “inferior” e “superior”, em função da morfologia dos taludes, levando em consideração a posição topográfica. O Setor A apresenta talude erosivo proeminente, com desnível altimétrico de aproximadamente 14 m do topo ao canal. Já os setores “B e C” apresentam talude erosivo desdobrado em dois patamares (superior e inferior), sendo o inferior em contato com o canal e o superior em contato com o topo do patamar inferior. Os setores “B e C” estão em uma dinâmica espelhada, estando o B na margem esquerda do canal e o C na margem direita.

Assim, considerando as características de cada setor monitorado e as condições dos terrenos, variou-se o distanciamento lateral entre as estacas instaladas, sendo de, aproximadamente, 2 m ou 3 m em relação às estacas vizinhas (Figura 3a). Em relação à distância da estaca ao talude erosivo, foram instaladas a 3 m do limite superior do talude (Figura 3b), visando atribuir margem de segurança mediante evoluções intensas. Para garantir um padrão de medida e reduzir as interferências, foram adicionados pinos de forma alinhada entre a estaca e o talude erosivo, garantindo a obtenção de uma reta (Figura 3c) e, conseqüentemente, um ponto de leitura padrão entre os monitoramentos (Figura 3d).

Com o auxílio de uma régua alinhada paralelamente ao lado esquerdo dos pinos, identificaram-se os pontos de leitura no talude erosivo (Figura 3d), posicionando a régua de leitura (Figura 3e), de forma nivelada, sobre os pontos. A régua de leitura possibilitou a projeção do talude, permitindo traçar uma reta suspensa até as estacas de monitoramento, desconsiderando possíveis irregularidades do terreno. Destaca-se, que a cada levantamento as estacas foram niveladas em cruz (Figura 3f), no intuito de reduzir ruídos nas medidas. Com as estacas niveladas, a trena a laser modelo Leica DISTO™ D5 foi posicionada sobre a cabeça da estaca, com seu sensor de leitura no limite da face voltada para o talude erosivo (Figura 3g). Assim, as medidas da distância entre as estacas e os taludes erosivos foram obtidas.



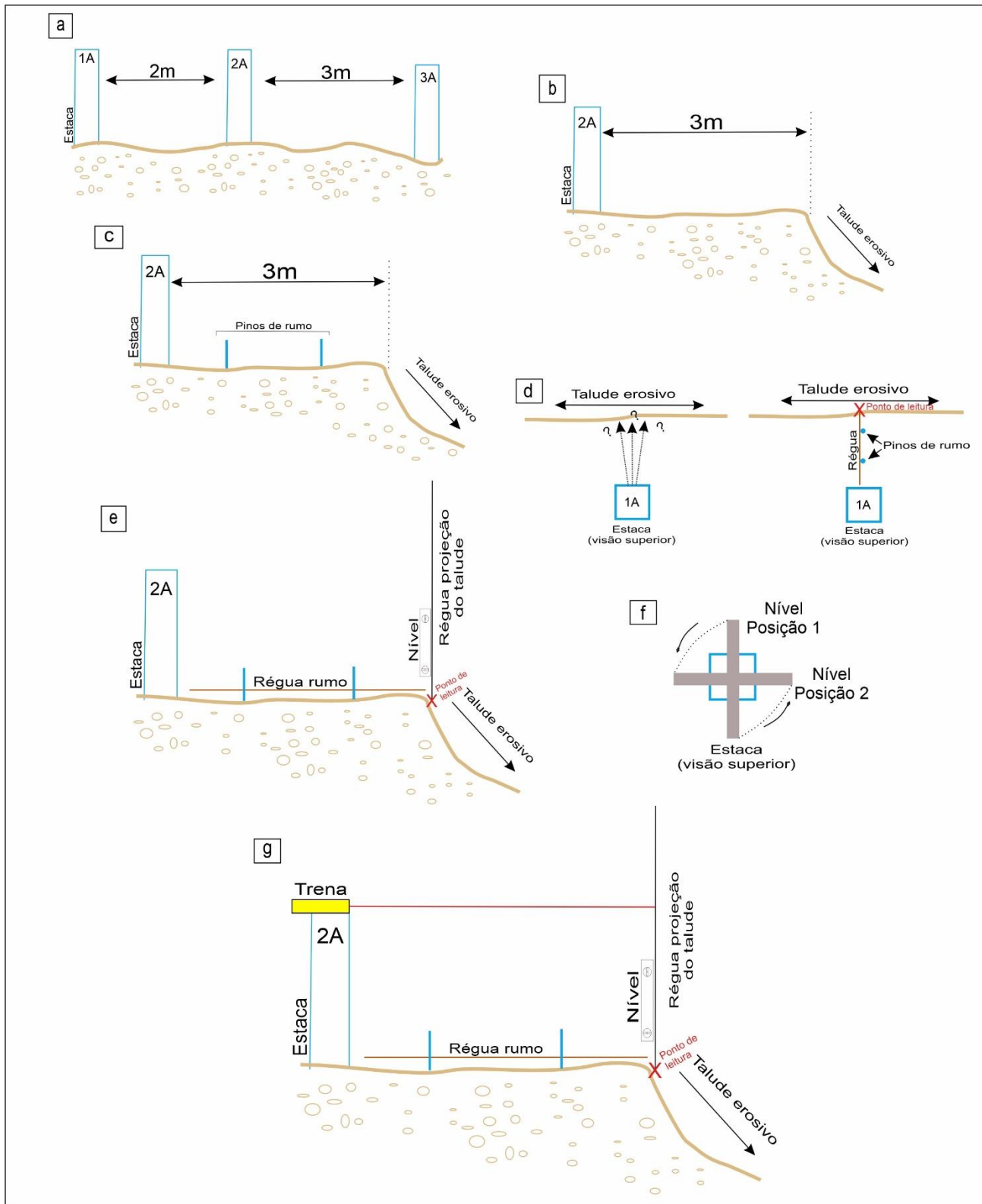


Figura 3 - Parâmetros utilizados para a instalação das estacas e para a leitura da dinâmica evolutiva dos taludes erosivos. (Fonte: os autores)

## PLUVIOMETRIA

Os dados pluviométricos foram coletados junto ao Banco de Dados Hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE. A estação de coleta apresenta prefixo D4-125 e está localizada nas coordenadas UTM 228344 e 7528546, apresentando distância em linha reta de 2,6 km da área de estudo. Ainda, os dados fornecidos pelo DAEE apresentam *déficit* de alguns meses, sendo que os últimos dados fornecidos vão até julho de 2022. Assim, visando equiparar os períodos de monitoramento do setor erosivo com os dados de chuva, os meses faltantes, até o último monitoramento (08/02/2023), foram preenchidos com dados do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas – CIIAGRO, utilizando de informações de estação localizada em Corumbataí (UTM 228393 e 7538858) a 9 km da área de estudo. A escolha da estação CIIAGRO foi realizada a partir do método Thiessen (Figura 4), aplicado por meio do ArcMap, utilizando a ferramenta *Create Thiessen Polygons*. Por fim, os dados pluviométricos foram organizados conforme o intervalo de tempo estipulado para o monitoramento erosivo (trimestral), visando uma análise comparativa.

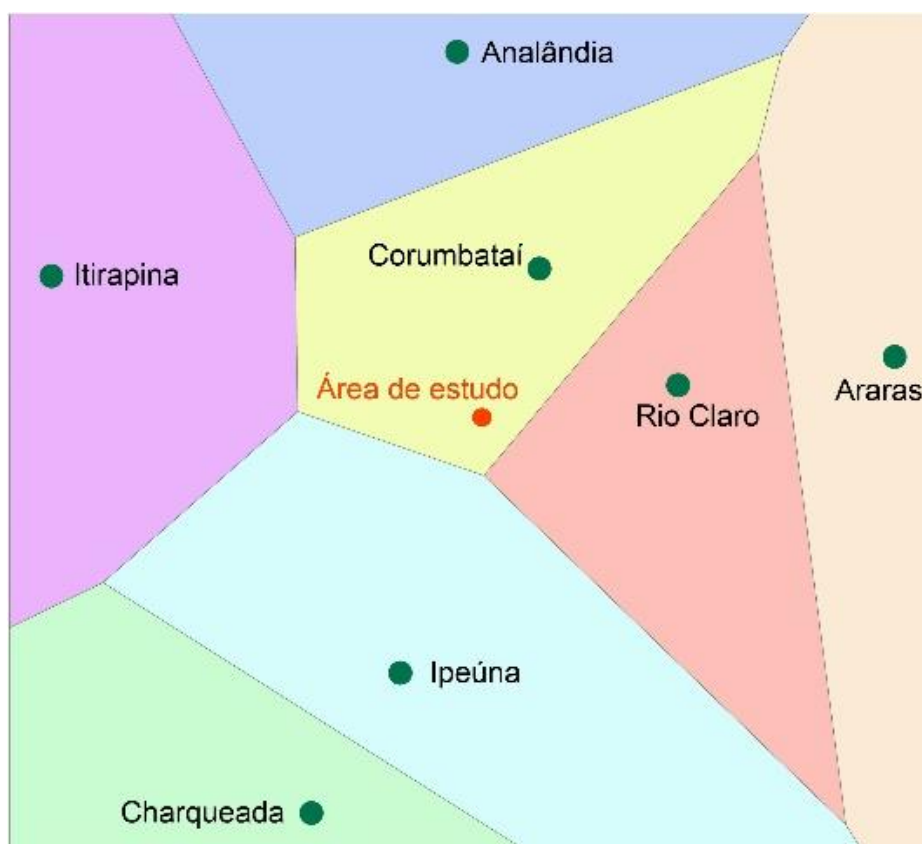


Figura 4 – Identificação de estação meteorológica com boa correspondência espacial com a área de estudo a partir do método Thiessen. Os pontos verdes correspondem às estações do CIIAGRO a um raio de 25 km da área de estudo. A variação de cores indica a zona de influência espacial de cada estação. (Fonte: os autores)

### III. RESULTADOS

#### DADOS DE MONITORAMENTO DO TALUDE EROSIVO

O talude erosivo monitorado apresenta um fator dinâmico, que se evidencia pelas características de campo (Figura 5) e por medidas que apontam perda (valores em vermelho) e expansão de material<sup>1</sup> (valores em verde na Tabela 1). De modo geral, quatro trimestres ganham relevância em relação aos valores totais de perda, sendo estes: fevereiro de 2021 (2,93 m de recuo do talude), maio de 2021 (2,33 m), novembro de 2021 (3,42 m) e fevereiro de 2022 (2,83 m). Em contraponto, os períodos com menor perda de material são registrados previamente e posteriormente ao período de perda de material mais significativa destacado, sendo estes: novembro de 2020 (0,19 m), maio de 2022 (0,22 m) e agosto de 2022 (0,14 m). Já a dinâmica de expansão mais significativa, se concentrou de forma sequencial nos meses de novembro de 2020 (0,69 m), fevereiro (0,44 m) e maio (0,26 m) de 2021, sendo os valores de expansão menos significativos registrados em novembro de 2022 (0,07 m) e em agosto de 2021 (0,13 m) (Tabela 1).

---

<sup>1</sup> A expansão do material é caracterizada pelo aumento da distância entre a estaca de monitoramento e o ponto de leitura, na borda do talude erosivo.

---

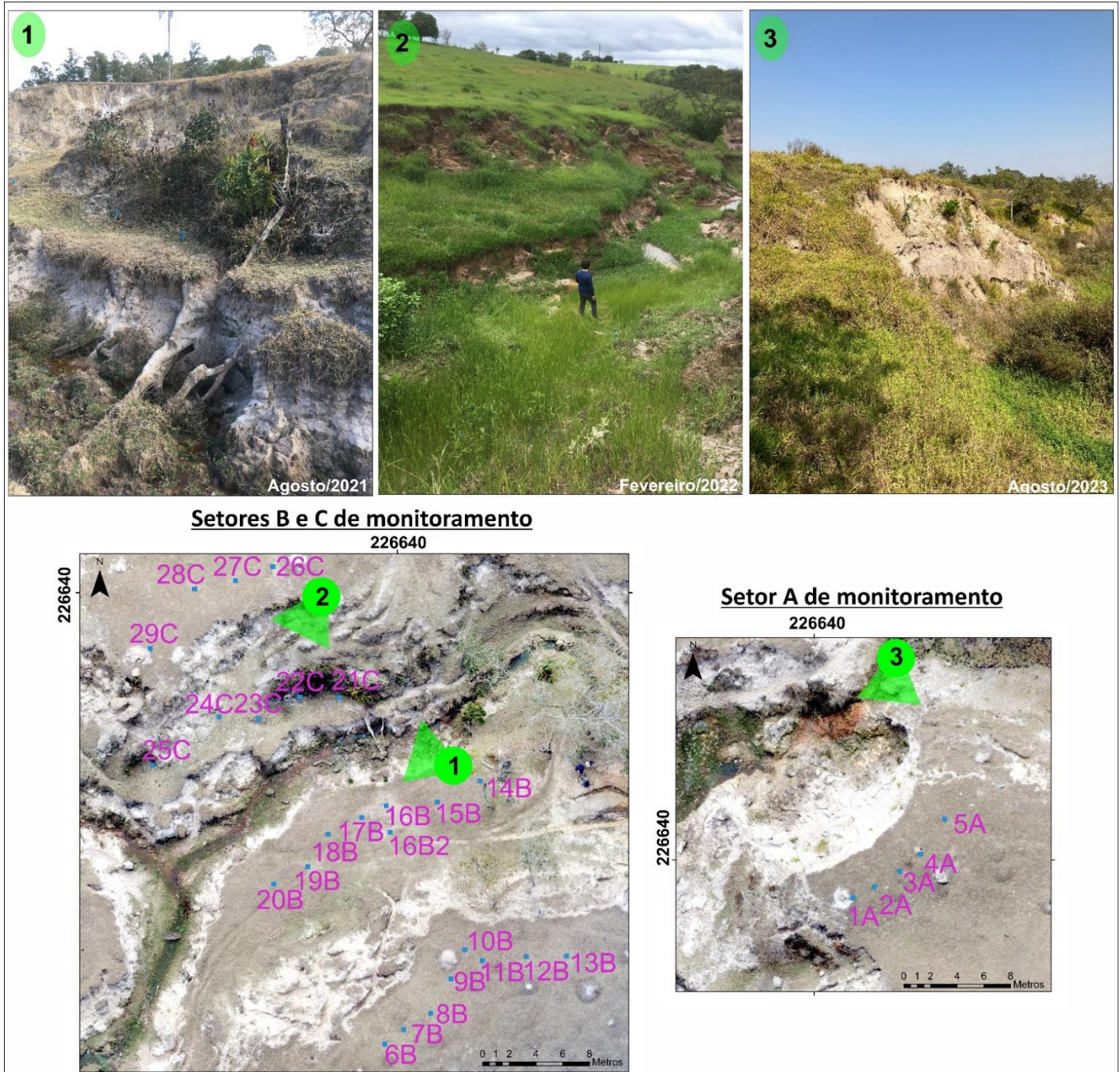


Figura 5 – Caracterização do sistema erosivo monitorado. (Fonte: os autores)



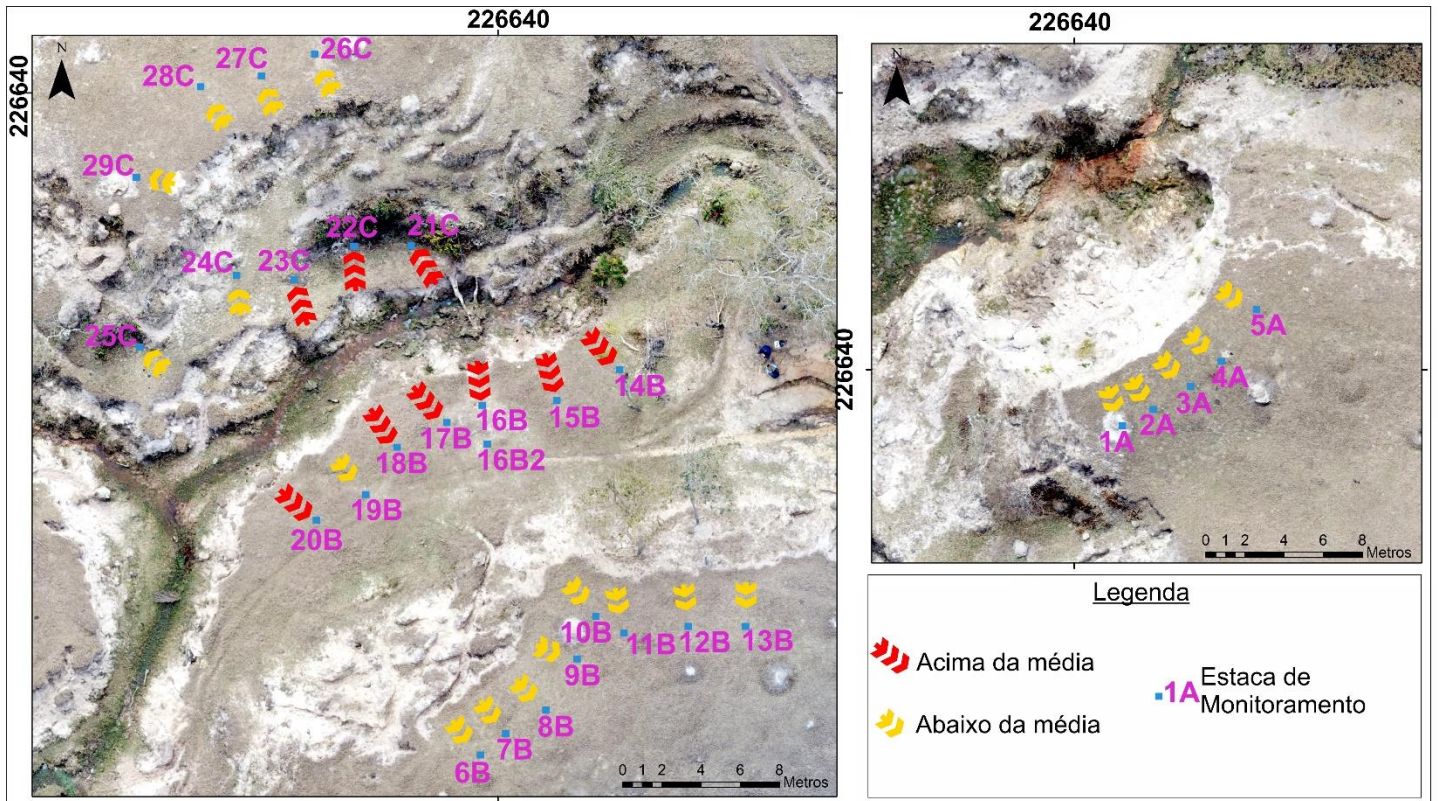


Figura 6 – Setores do talude erosivo e suas respectivas dinâmicas. A média total de perda de material durante o período analisado foi 0,50 metros. (Fonte: os autores)

#### DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Os trimestres com volumes mais significativos são os que se encerraram em fevereiro de 2020, 2021 e 2022, com o volume máximo de chuva no período registrado em 2021 (762,7 mm, Tabela 2). Sobre a intensidade dos eventos pluviométricos, aponta-se para chuvas diárias de maior intensidade registradas em dezembro de 2020 com 34,4 mm/dia, em novembro de 2021 com 90,8 mm/dia e em janeiro de 2022 com 60,2 mm/dia, sendo que tais eventos apresentam consonância com o período de volumes mais significativos (novembro a fevereiro). Já em relação aos períodos, merecem destaque: de 19 a 20 novembro de 2021 (média de 63,5 mm/dia) e de 29 a 31 de janeiro de 2022 (38,4 mm/dia).

Já os trimestres que se encerraram em agosto de 2020, 2021 e 2022 foram os que apresentaram menor volume pluviométrico, com um extremo de 1,5 mm no respectivo trimestre de 2022. Assim, considerando os períodos mais secos, verifica-se que de maio a novembro de 2020 registrou-se 134,7 mm de chuva, no mesmo período, em 2021, 192,5 mm e em 2022, 203,7 mm.



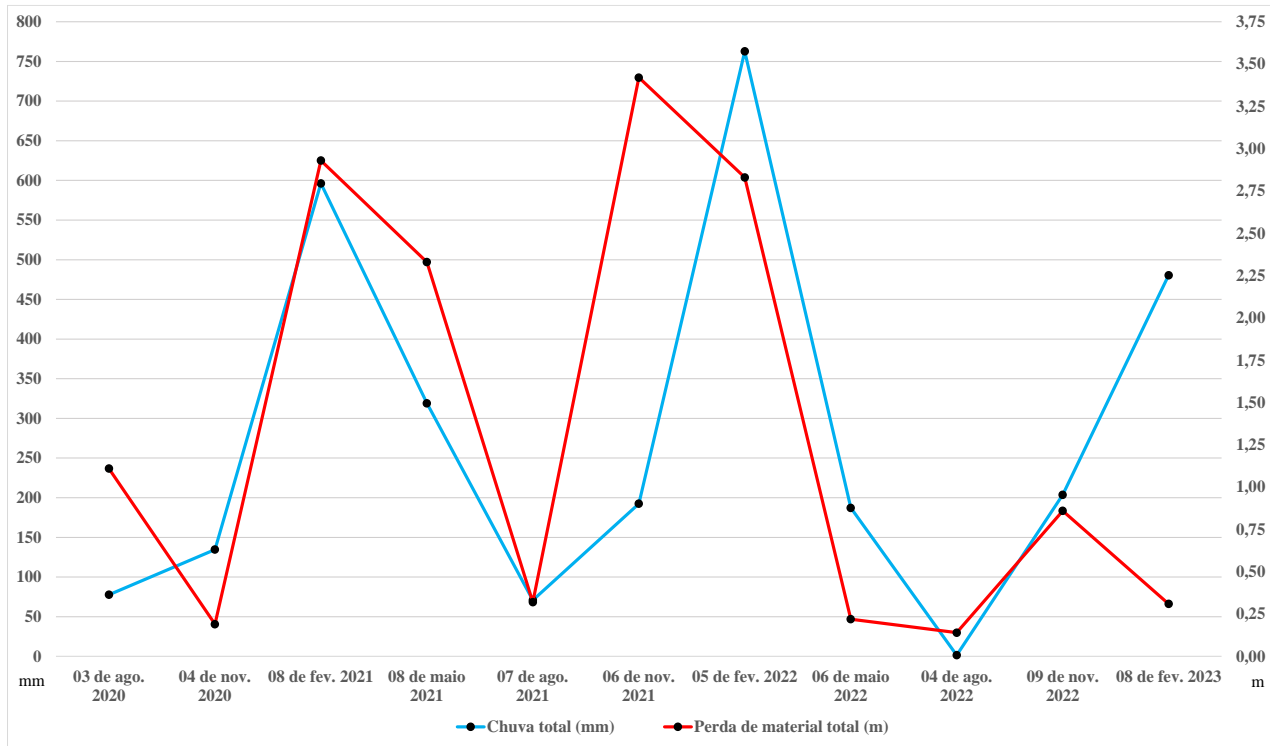


Figura 7 – Interação entre os dados pluviométricos e de perda de material por trimestres. Fonte: os autores

#### IV. DISCUSSÃO

A perda de material constitui-se em uma característica clássica dos taludes erosivos de voçorocas com grau significativo de dinamicidade, na qual materiais se desprendem do mesmo, se acumulando ou sendo transportados pelo canal. De acordo com Bigarella (2003), a evolução morfológica dos taludes erosivos de voçorocas está intrinsecamente ligada aos fluxos de superfície e de subsuperfície, os quais contribuem para perda de material a partir da liquefação, ocasionando movimentos de massa e morfologias em forma de degrau, assim como escavações na base dos taludes em forma de concha com subsequente solapamento. De acordo com Wang *et al.* (2016), o processo de solapamento pode ocorrer por cisalhamento (*shearing failure*), tombamento (*toppling failure*) e/ou stress (*stress failure*) (Figura 8). Já Oliveira (1999) destaca a dinamicidade a partir do processo de erosão por quedas d'água (*plunge pool erosion*), a qual pode ocorrer em taludes erosivos mais coesos na parte superior e menos coesos no sopé, sendo que, no processo de entrada do fluxo no sistema erosivo, ocasiona linhas de fluxo que criam um vórtice, com inversão da direção de fluxo na base do talude, gerando um processo de retirada de material. Ainda, fluxos superficiais com volumes reduzidos ocasionam filmes d'água no talude erosivo, gerando feições intituladas de filetes subverticais de escoamento superficial (OLIVEIRA, 1999).



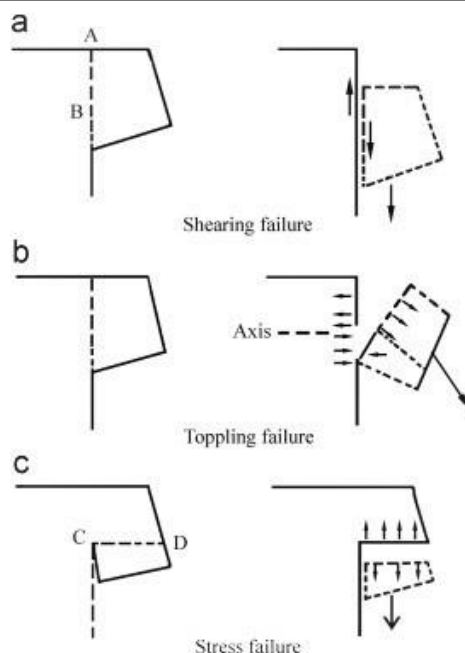


Figura 8 – Tipos de solapamento. (Fonte: WANG *et al.*, 2016)

Ainda em relação a perda de material, o fato dos setores inferiores B e C serem mais dinâmicos pode estar associado a atuação do canal. De acordo com Wells *et al.* (2013), o volume de água no canal terá uma interação determinante com os taludes. Se a coluna d'água estiver atuando no topo do talude, a mesma poderá exercer uma pressão confinante, a qual tenderá a manter o material em seu lugar. Colunas d'água menos profundas, em comparação a altura do talude, poderão atuar no sopé do mesmo, ocasionando a retirada de material, tornando tais taludes mais suscetíveis a ocorrência de processos gravitacionais (WELLS *et al.*, 2013). Outro fator que contribui para hipótese de atuação do canal na perda de material, são os dados dos setores B e C superiores, os quais não estão em contato com o canal e evidenciam grande parte dos setores monitorados em estabilidade ou com baixa dinamicidade.

Já a expansão do talude erosivo constitui-se em uma dinâmica pouco explorada na literatura, sendo possível sua verificação somente a partir de técnicas de monitoramento de detalhe do talude erosivo. Neste sentido, o processo de tombamento (WANG *et al.*, 2016) pode se constituir em um caminho de análise, uma vez que, previamente ao solapamento, a parte superior do talude pode inclinar-se para o interior das voçorocas, sendo que, de acordo com a técnica de monitoramento utilizada, pode aumentar a distância entre a estaca e o ponto de leitura no talude erosivo. Alguns pontos de monitoramento ratificam tal informação (Tabela 1). Por exemplo, o Ponto 20B apresentou 0,11 m de aumento da distância da estaca ao talude em fevereiro de 2021 (valor mais significativo no período de análise), sendo que no monitoramento seguinte

(maio de 2021) registrou-se 0,45 m de recuo do talude; o Ponto 23C apresentou 0,10 m aumento da distância em fevereiro de 2021, registrando perda de material de 0,49 m em maio de 2021 (monitoramento seguinte); Ponto 24C, expansão de 0,07 m em novembro de 2020, culminando em 0,22 m de recuo no monitoramento seguinte (fevereiro de 2021); Ponto 16B, 0,06 m de expansão em novembro de 2021, com 0,55 m de evolução em fevereiro de 2022; Ponto 14B, com destaque para o fator não linear no processo e resposta, com expansão seguidas de 0,07 m (maio de 2021) e de 0,01 (agosto de 2021), culminando em perda de material em de 0,54 m em novembro de 2021.

No entanto, nem todos os dados/pontos apresentam relação direta entre expansão e posterior solapamento. Com isso, também é importante analisar a dinâmica expansiva a partir dos fenômenos de expansão do material por hidratação e ocupação do ponto de leitura do talude erosivo por gramíneas. Sobre a expansão do material por hidratação, esta é relevante em solos com altas porcentagens de silte e argila (COCCO *et al.*, 2015). Os solos do setor analisado são predominantemente caracterizados como Argissolos Vermelho Amarelo Distrófico, da unidade Serrinha (KOFFLER *et al.*, 1992), os quais apresentam mudança textural abrupta representada por um horizonte B textural. Em superfície ocorre um domínio de areia de granulometria fina (OLIVEIRA; PRADO, 1984). Desta forma, de acordo com a carta pedológica (KOFFLER *et al.*, 1992), é possível a ocorrência de frações finas (silte e argila) no setor. Por sua vez, sobre as gramíneas, estas podem ter variações significativas no índice de massa foliar e consequentemente de fitomassa, a partir da disponibilidade de água e estação do ano (VIANA *et al.*, 2007), fato que, por estarem localizadas nos pontos de leitura (ponto de posicionamento da régua de leitura), podem interferir e variar a medida em alguns centímetros. Em campo, verificou-se a ocorrência de franjas de gramas sobrepostas à parte superior do talude erosivo (Figura 9), cabendo destacar que mesmo em períodos secos (agosto de 2021) as franjas apresentam-se sobre os pontos de leitura, ocasionando interferências.



Figura 9- Franja de grama sobre os pontos de leitura em agosto de 2021. (Fonte: os autores)

Destaca-se ainda que a área de estudo era predominantemente recoberta por pastagens destinadas à pecuária, com gado em sistema de pastejo livre, sem rotacionamento. De acordo com os dados obtidos junto ao proprietário, a área de estudo apresentou gado até 26/11/2021, sendo a área de voçorocamento cercada em 07/06/2022. Destaca-se, que o período de monitoramento subsequente (Figura 10) a retirada do gado (fevereiro de 2022) apresentou marcante perda total de material (recoo de 2,83 m do talude), no entanto, compreende-se que a cobertura vegetal pode levar alguns meses para recompor sua vitalidade e recobrir significativamente o solo, elemento que, a princípio, justifica parte da perda de material registrada em fevereiro de 2022 mesmo com o setor sem gado. Já nos monitoramentos seguintes, de maio de 2022 a fevereiro de 2023, os valores totais de perda de material apresentam reduções significativas a partir da análise comparativa entre os períodos anteriores e posteriores a retirada do gado e cercamento.

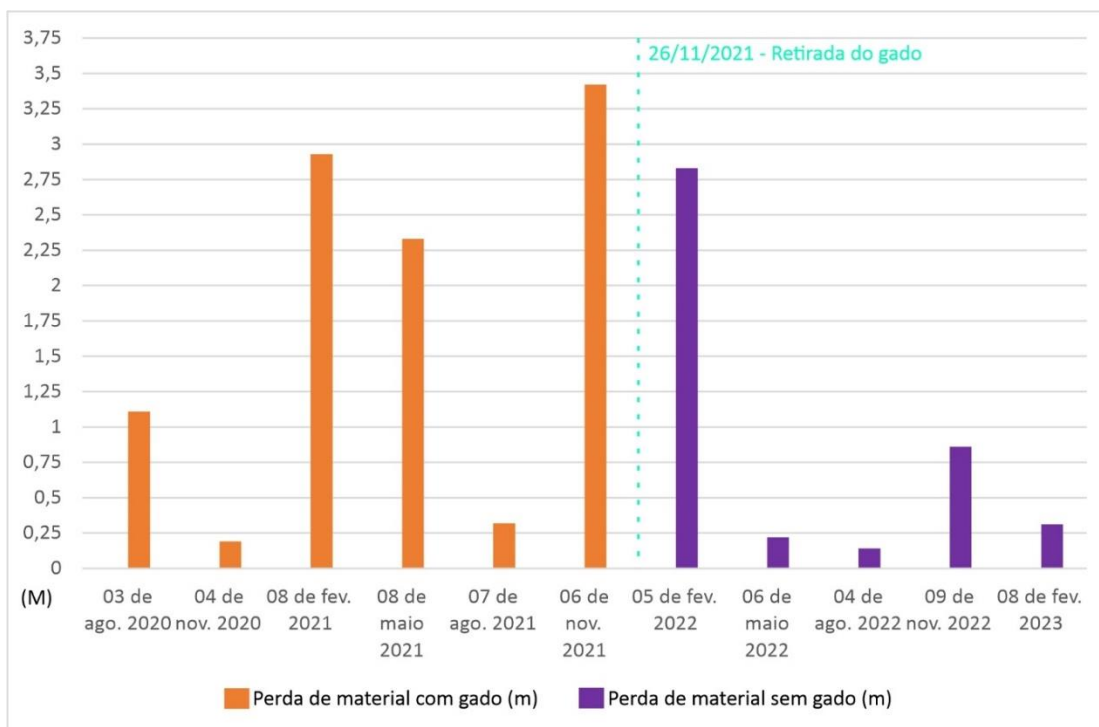


Figura 10 – Dados de perda de material por período sem e com gado acessando o sistema erosivo monitorado. Fonte: os autores

Neste sentido, a pesquisa de Zanatta *et al.* (2019), em estudo aplicado à Marabá Paulista (SP), localizada na região do Pontal do Paranapanema, reforça a relação entre voçorocas e as áreas de pastagens destinadas à pecuária. De acordo com os autores, desde 1963 as feições erosivas lineares mapeadas apresentam relação intrínseca com pastagens classificadas como pasto e pasto sujo, sendo que o pasto sujo se constitui em setores de pastagem com baixa manutenção, caracterizados por gramíneas entremeadas por espécies vegetais arbustivas. Neste contexto, as voçorocas constituem-se na feição linear com relação mais determinante com as pastagens, uma vez que em 1997, 100% das feições mapeadas ocorreram em área de pasto (ZANATTA *et al.*, 2019). Assim, compreende-se que a retirada do gado da área de estudo desta pesquisa tenha influenciado na redução da perda de material do talude erosivo.

Sobre os dados de chuva e a relação com a perda de material, a consonância identificada entre o aumento da chuva e a perda de material em sete trimestres constitui-se em uma dinâmica esperada e debatida de forma ampla na bibliografia (ANDERSON *et al.*, 2021). Como evidencia Oliveira (1999), processos como a erosão por quedas d'água e formas como os filetes subverticais de escoamento superficial, ratificam a atuação dos fluxos provenientes das chuvas nos taludes erosivos. Vale ressaltar que a resposta dos taludes erosivos aos fluxos pluviométricos também é influenciada por um desgaste interno das voçorocas. Conforme análise de sistemas erosivos instalados na bacia hidrográfica do Rio Burdekin – Nordeste da Austrália, Daley *et*

*al.* (2023) constataram que os fluxos pluviométricos podem originar taxas de degastes vertical de até  $10^2 \text{m/ano}^{-1}$ , o que pode representar até 160 t/ha de erosão, as quais podem contribuir com até 80% da erosão registrada no balanço de sedimento dos sistemas erosivos monitorados.

Já nos trimestres com relação distinta entre chuva e perda de material, averígua-se que em novembro de 2020 os dados de chuva não apresentam volume/dia muito significativos (Tabela 2). Tal fato pode ter contribuído para a menor perda de material do talude erosivo, justificando, a princípio, o aumento de chuva com a redução na perda de material (Figura 7) neste respectivo período. Já sobre fevereiro de 2022 e de 2023 pode-se encaminhar a análise para a questão da umidade antecedente (KARIMOV *et al.*, 2015). Como é possível constatar no Figura 7, a ascendência da curva dos dados pluviométricos inicia entre os monitoramentos de agosto e novembro de 2021 e 2022. Com isso, entende-se que tais chuvas hidratam os solos, propiciando maior agregação das partículas e conseqüentemente maior resistência dos materiais (KARIMOV *et al.*, 2015). Portanto, mesmo com volumes de chuva ascendentes em fevereiro de 2022 e em fevereiro de 2023, os solos da área monitorada apresentam maior agregação fruto da umidade antecedente, fazendo com que os valores totais de perda de material apresentem queda.

## V. CONCLUSÕES

Os dados apontam para duas dinâmicas evolutivas do talude erosivo da voçoroca. A perda de material constitui-se em uma dinâmica clássica e conhecida vinculada ao solapamento da base, a erosão por quedas d'água e da atuação do canal. Já a expansão do material constitui-se em temática pouco explorada na bibliografia, sendo que neste artigo as hipóteses de análise se pautaram em expansões associadas aos processos de solapamento em curso; à expansão dos materiais por hidratação, característica típica em materiais com composição significativa de silte e de argila; e à ocupação dos pontos de leitura por gramíneas, tanto em período seco, como em período úmido. Ainda, a retirada do gado da área de estudo evidenciou-se como uma variável de peso para a compreensão da dinamicidade do respectivo sistema erosivo, uma vez que grande parte dos períodos de monitoramento posteriores a retirada do gado apresentaram redução nos valores de perda de material. Por fim, as chuvas também se apresentam como uma variável de interesse para compreensão das dinamicidades dos taludes erosivos em 07 dos 10 trimestres analisados, sendo tal fato evidenciado pela consonância entre aumento do volume pluviométrico e aumento da perda de material. No entanto, 03 trimestres apresentaram uma relação inversa entre chuva e perda de material, sendo tal dinâmica associada a eventos pluviométricos pouco intensos na relação precipitação/dia (período de novembro de

2020), e relacionada a umidade antecedente dos solos em relação aos períodos de fevereiro de 2022 e de 2023, umidade a qual pode ocasionar maior coesão dos solos, desencadeando um cenário menos suscetível a ocorrência de perda de material nos taludes erosivos.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil, processo número 306333/2020-1. Os autores agradecem a senhora Claudimara Tomazella e aos senhores Carlos Augusto Tomazella e Luenes Kelly Cabral por permitirem o acesso a área de estudo.

### VI. REFERÊNCIAS

- ANDERSON, R. L.; ROWNTREE, K. M.; LE ROUX, J. J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. *Catena*, v. 206, p. 105482, 2021. DOI: 10.1016/J.CATENA.2021.105482
- BEZERRA, M. O.; BAKER, M., PALMER, M. A.; FILOSO, S. Gully formation in headwater catchments under sugarcane agriculture in Brazil. *J. Environ. Manage.* v. 270, p. 110271, 2020. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110271
- BIGARELLA, J. J. Estrutura e Origens das Paisagens Tropicais e Subtropicais: processos erosivos, vertentes, movimentos de massa, atividade endógena, superfície de erosão, compartimentação do relevo, depósitos correlativos e ambientes fluviais. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003.
- BOARDMAN, J. How old are the gullies (dongas) of the Sneeuwberg uplands, Eastern Karoo, South Africa? *Catena*, v. 113, p. 79–85, 2014. DOI: 10.1016/J.CATENA.2013.09.012
- CASTILLO, C.; GOMÉZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, v. 160, p. 300-319, 2016. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.07.009
- COCCO, S.; BRECCIAROLI, G.; AGNELLI, A.; WEINDORF, D.; CORTI, G. Soil genesis and evolution on calanchi (badland-like landform) of central Italy. *Geomorphology*, v. 248, p.33-46, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.031>
- CÔRTEZ, A.; PERINOTTO, J. A. Fácies e associação de fácies da Formação Piramboia na região de Descalvado (SP). *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, v. 15, n. 3-4, p. 23-40, 2015. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v15i3-4p23-40
- DALEY, J. S.; SPENCER, J. R.; BROOKS, A. P.; JUSTIN C. S.; THWAITES, R. Direct rain splash and downwearing of internal surfaces as an important erosion process in alluvial gully development. *Catena*, v.221, p. 106760, 2023. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106760
- DUBE, H. B.; MUTEMA, M.; MUCHAONYERWA, P.; POESEN, J.; CHAPLOT, V. A global analysis of the morphology of linear erosion features. *Catena*, v.190, p. 104542, 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104542
- EMPLASA – Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano. Projeto Mapeia São Paulo. São Paulo, 2010.

Color. Escala 1:25.000.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicações. 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. p. 139-155.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1981. Escala: 1.000.000

INTITUO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – IGCSPP. Plano Cartográfico do Estado de São Paulo. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1979. No color. Escala: 1:10.000.

INTITUO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – IG. Formações Geológicas de Superfície. Folha Corumbataí, 1984.

KARIMOV, V.; SHESHUKOV, A.; BARNES, P. Impact of precipitation and runoff on ephemeral gully development in cultivated croplands. Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci. v. 367, p. 87–92, 2015. DOI: 10.5194/PIAHS-367-87-2015

KOFFLER, N. F. et. al. Solos da bacia do Rio Corumbataí. Rio Claro: Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1992. Escala: 1:50.000

MELLO, B. F. Dinâmica pluvial e turismo em Corumbataí – SP. 2014. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2014. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/124146/000830501.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 04 de agosto de 2023.

MENDES, I. A. A dinâmica erosiva do escoamento pluvial na bacia do córrego Lafon – Araçatuba – SP. 1993. 171f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos – II Memorial Descritivo. Boletim Técnico Nº 98. Campinas: Instituto Agrônomo, 1984.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 57-99.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. Catena, v. 50, n. 2-4, p. 91-133, 2003. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1

RUBEY, W. W. Gullies in the Great Plains formed by sinking of the ground. American Journal of Science, v. s5-15, n.89, p. 417-422, 1928. DOI: 10.2475/ajs.s5-15.89.417

SILVA, M. M.; LUPINACCI, C. M. Análise de variáveis morfométricas da Alta Bacia do Ribeirão da Boa Vista- Corumbataí (SP): subsídios ao planejamento ambiental de paisagem rural em escala de detalhe. Geografia, v. 46, p. 1–24, 2021. DOI: 10.5016/geografia.v46i1.15451

TEBEBU, T. Y.; ABIY, A. Z.; ZEGEYE, A. D.; DAHLKE, H. E.; EASTON, Z. M.; TILAHUN, S. A.; COLLICK, A. S.; KIDNAU, S.; MOGES, S.; DADGARI, F.; STEENHUIS, T. S. Surface and subsurface flow effect on permanent gully formation and upland erosion near Lake Tana in the northern highlands of Ethiopia. Hydrol. Earth Syst. Sci., v. 14, n. 11, p. 2207–2217, 2010. DOI: 10.5194/HESS-14-2207-2010

VIANA, M. C. M.; QUEIROZ, C. G. S.; LEMOS FILHO, J. P.; ANDRADE, C. L. T.; FREIRE, F. M.; PURCINO, H. M. A.; RESENDE, G. A. Acúmulo de fitomassa e índice de área foliar de gramíneas forrageiras

em sistema irrigado e de sequeiro. 44<sup>a</sup> Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia – UNESP – Jaboticabal. 2007.

WANG, Y.; KUANG, S.; SU, J. Critical caving erosion width for cantilever failures of river bank. *Int. J. Sediment Res.* v. 31, p. 220–225, 2016. DOI: 10.1016/J.IJSRC.2016.05.003

WELLS, R. R.; MOMM, H. G.; RIGBY, J. R.; BENNETT, S. J.; BINGNER, R. L.; DABNEY, S. M. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows. *Catena*, v. 101, p. 114–121, 2013. DOI: 10.1016/J.CATENA.2012.10.004

ZANATTA, F. A. S.; LUPINACCI, C. M.; BOIN, M. N. Dinâmica erosiva linear: estudo de caso em área rural no oeste paulista. *Geografia*, v. 44, p. 273–294, 2019. DOI: 10.5016/geografia.v44i2.15117

---