



DINÂMICAS PEDOGEOMORFOLÓGICAS E CONTROLE DE VOÇOROCA POR MÉTODOS GEOTÉCNICOS

Dynamics and Control of Gully Erosion through Geotechnical Methods.

Dinámica y control de la erosión de cárcavas mediante métodos geotécnicos

Guilherme Alves de Oliveira¹ 

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer parâmetros geotécnicos para monitorar uma voçoroca em São José dos Campos - SP, com foco na compreensão dos processos de erodibilidade em Argissolos. A pesquisa analisa as variações dos limites físicos do Argissolo ao longo do tempo, especialmente a progressão da borda de cabeceira da voçoroca. A integração das geociências com ensaios de mecânica dos solos auxilia na compreensão dos fenômenos geomorfológicos, considerando tanto erodibilidade quanto erosividade. O estudo descreve as características físicas da área de estudo e critérios de uso do solo que influenciam os processos erosivos, correlacionando técnicas de monitoramento com análises geotécnicas em topossequências. A revisão bibliográfica abrange fenômenos geomorfológicos em vertentes, destacando a erodibilidade em Argissolos, apoiada em estudos de Ross, Guerra e outros autores. Os resultados buscam disseminar análises geotécnicas na geomorfologia, proporcionando interpretações funcionais das dinâmicas e dados quantitativos, cruciais para o planejamento e gestão de áreas degradadas e restauração ecológica de vertentes.

Palavras-chave: Geotecnia; Geomorfologia; Restauração Ecológica.

ABSTRACT

This research aims to establish geotechnical parameters for monitoring a gully in São José dos Campos - SP, with a focus on understanding the erodibility processes in Argissolos. The research analyzes the variations in the physical limits of the Argissolo over time, particularly the progression of the headcut of the gully. The integration of geosciences with soil mechanics tests aids in comprehending the geomorphological phenomena, considering both erodibility and erosivity. The study describes the physical characteristics of the study area and land use criteria that influence erosive processes, correlating monitoring techniques with geotechnical analyses in topossequences. The literature review covers geomorphological phenomena in slopes, highlighting erodibility in Argissolos, based on studies by Ross, Guerra, and other authors. The results aim to disseminate geotechnical analyses in geomorphology, providing functional interpretations of dynamics and quantitative data, essential for planning and managing degraded areas and the ecological restoration of slopes.

Keywords: Geotechnics; Geomorphology; Ecological Restoration.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo establecer parámetros geotécnicos para monitorear una voçoroca en São José dos Campos - SP, con un enfoque en comprender los procesos de erodibilidad en Argissolos. El estudio analiza las variaciones en los límites físicos del Argissolo a lo largo del tiempo, especialmente la progresión de la cabecera de la voçoroca. La integración de las geociencias con pruebas de mecánica de

¹ Doutor em Geografia pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). **E-mail:** downgeogui@gmail.com

suelos ayuda a comprender los fenómenos geomorfológicos, considerando tanto la erodibilidad como la erosividad. El estudio describe las características físicas del área de estudio y los criterios de uso del suelo que influyen en los procesos erosivos, correlacionando las técnicas de monitoreo con análisis geotécnicos en topossecuencias. La revisión bibliográfica abarca fenómenos geomorfológicos en laderas, destacando la erodibilidad en Argissolos, basada en estudios de Ross, Guerra y otros autores. Los resultados buscan difundir análisis geotécnicos en geomorfología, proporcionando interpretaciones funcionales de la dinámica y datos cuantitativos, esenciales para la planificación y gestión de áreas degradadas y la restauración ecológica de laderas.

Palabras-clave: Geotecnia; Geomorfología; Restauración Ecológica.

INTRODUÇÃO

Com o escopo de estabelecer considerações acerca dos processos que envolvem a dinâmica de erodibilidade nos Argissolos, o presente trabalho busca estabelecer parâmetros indicativos geotécnicos aplicados ao monitoramento de uma voçoroca localizada em uma unidade de preservação no município de São José dos Campos, SP.

O principal eixo da pesquisa se atém às variações dos limites físicos do Argissolo no período amostrado, tendo como principal reflexo a progressão da bordadura de cabeceira da voçoroca. Tais parâmetros sintetizam a perspectiva integradora das geociências aos quais os ensaios oriundos da mecânica dos solos auxiliam na compreensão dos fenômenos geomorfológicos tendo como cerne indicativo os elementos da erodibilidade e não somente da erosividade.

Busca-se então desenvolver uma breve descrição das características físicas do recorte de estudo, critérios de uso e ocupação do solo que deliberaram a possível incidência e progressão dos processos erosivos e por fim correlacionar as técnicas de monitoramento com os atributos quantitativos oriundos das análises geotécnicas em topossecuencias.

Para tal, recorre-se a uma revisão da ocorrência e dinâmicas dos fenômenos geomorfológicos em vertentes pautado em Ross et al. (2022), Guerra e Marçal (2015), Reis et al. (2020) e demais autores, expressando as características de erodibilidade comum aos Argissolos tendo como base apontamentos de Velasquez e Righes (2019), Slimane et al. (2018) dentre outros, e técnicas metodológicas para as análises laboratoriais de cunho qualitativo e quantitativo.

Os direcionamentos das análises e resultados expressos pela pesquisa buscam a difusão das análises geotécnicas para com a geomorfologia, permeando acepções funcionais para a interpretação das dinâmicas bem como as expressões de dados quantitativos, sendo ambos os critérios essenciais para planos e manejos de áreas degradadas e de restauração ecológica voltado para áreas de vertentes.

O Recorte de Estudo

Situada nas dependências do Parque Natural Municipal Augusto Ruschi (PNMAR), a área de estudo integra-se ao extremo norte do município de São José dos Campos que detém um histórico multifacetado quanto aos destinos e uso do meio antes de ser integrado ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC).

A localidade ao qual se insere a voçoroca se localiza paralelo a estrada de acesso à sede do PNMAR, situando-se em uma área sujeita ao efeito de borda e sendo esta mais sucessível a manifestações do uso do solo em comparação com à área core do fragmento florestal.

Até 1932 quando a prefeitura do município obteve progressivamente a cessão da área para captação de água, substituída posteriormente pela captação do rio Paraíba do Sul, a mesma era denominada como “Fazenda Boa Vista” onde conforme o documento planta da fazenda as áreas mais declivosas eram direcionadas a pastagens e criação extensiva de gados e as áreas menos íngremes voltadas para a monocultura do café, com exceção à “área de mata” (Morelli, 2005).

De antemão cabe apontar a relevância no histórico da área, pois os reflexos do uso do solo serão evidenciados de forma qualitativa pelo desenvolvimento da voçoroca e qualitativa quando apresentados os dados dos índices físicos de coesão do solo.

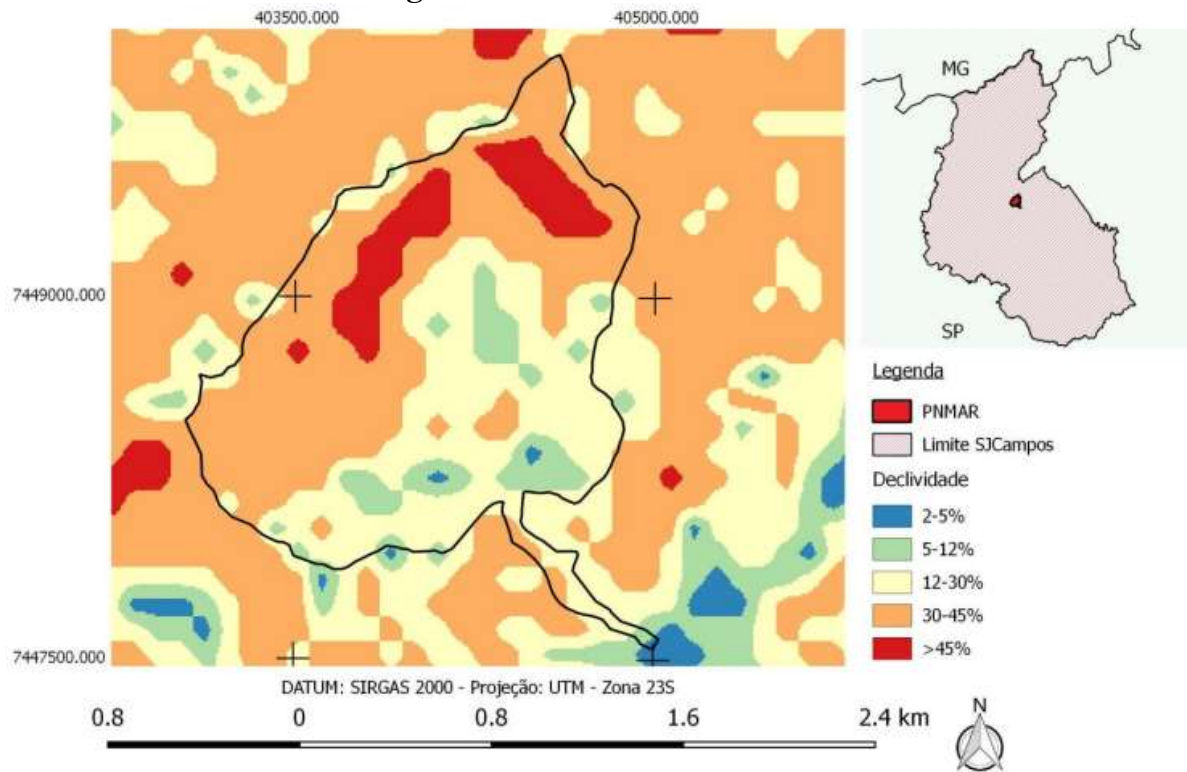
A área em questão é suscetível ao efeito de borda e é considerada uma zona de recuperação. A restauração da sucessão fitofisiológica é desafiadora devido à predominância de gramíneas aloctones (brachiarias) em detrimento das forrageiras e outras espécies tropófilas nativas da floresta semidecidual de mata atlântica.

O recorte de estudo é dominado por dois grupos geológicos e litoestratigráficos: o grupo Açungui, composto por micaxistos do complexo pilar, e o grupo Paraíba do Sul, onde ocorrem os granulitos migmatizados. Essa área apresenta uma forte correlação com os processos metamórficos resultantes da ascensão do horst da Serra da Mantiqueira durante o período Neogeno (Hasui; Cremonini; Born, 1984).

A geomorfologia do recorte pauta-se nos domínios de mares de morros, enquadrando-se nas descrições de Ab'Sáber (2012, p. 16) ao afirmar que “Há uma forte presença da decomposição de rochas cristalinas e do processo de convexização em níveis intermontanos, fato que faz suspeitar uma alternância entre a pedimentação e a mamelonização nesses compartimentos”.

Apresenta-se então um mapa (Figura 1) que expressa os parâmetros de declividade com o intuito de observar as diferenciações empregadas no recorte de estudo.

Figura 1 - Classes de Declividade do PNMAR



Fonte: Autor (2020).

Neste sentido há um contraste entre os períodos de pedogênese e morfogênese no recorte de estudo, levando a crer que a influência da pedogênese no momento da pesquisa aponta-se suprimida pela dinâmica morfogênica em função da declividade, majoritariamente elencada como de média a alta com valores entre 20% a 40% (Guerra; Marçal, 2015).

Em confluência com os parâmetros de declividade, geomorfologia e geologia, foi realizado um diagnóstico do solo ao qual se atribui até o terceiro nível do sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS) a sigla “PVAdf” cujo a nomenclatura se direciona aos Argissolos Vermelho-Amarelo distroférico, compartilhando as caracterizações supra citadas pela influência do meio físico na pedogênese e, em conformidade com a descrição de que os;

Argissolos normalmente são também bastante intemperizados, mas, ao contrário dos latossolos, apresentam uma marcante diferenciação de horizontes, com um B de acúmulo de argila. Segundo o SiBCS, eles são definidos por um horizonte B textural imediatamente abaixo de um horizonte A ou E [...] O relevo também é muito variável, montanhoso a suave ondulado. Quando associados aos Latossolos, costumam se situar em relevo mais declivoso. Se situados em áreas montanhosas, com fortes declives, nessas condições, estão muito sujeitos à erosão (Lepsch, 2002, p. 101).

Metodologia

A apresentação dos recursos metodológicos se concentra em três frentes de aplicação para o estudo do caso em questão, sendo elas expressivamente; monitoramento de progressão da voçoroca, determinação dos parâmetros físicos do solo e plano e execução de restauração da área. Prossegue-se então com uma breve descrição dos procedimentos seguindo esta ordem.

Para o monitoramento da voçoroca optou-se pela metodologia de estaqueamento proposta por Guerra, Morgado e Santos (2009) onde foram dispostas cinco estacas a 1 metro de distância da borda com o intuito de aferir a progressão da dinâmica erosiva em função da redução da distância das bordas para com as estacas.

No que circunda o conjunto metodológico para a determinação dos parâmetros físicos, conta-se com metodologias de obtenção granulométrica conforme o “manual de métodos de análise de solo” (Teixeira *et al.*, 2017). Foram realizadas seis amostras respeitando os três pontos de topossequencia da vertente e em duas profundidades, de 20 e 60 centímetros.

Em confluência com tais procedimentos metodológicos, empregam-se também os procedimentos para obtenção dos índices e limites físicos de Atterberg com o intuito de conceber os elementos quali-quantitativos comportamental das amostras em relação ao período amostral. Para tal empregam-se as normativas técnicas da ABNT expressas pelas NBR 11682/2009, 6459/2017, 7180/2016 que visam os desdobramentos funcionais para os aferimentos e normativas empregadas nesta pesquisa.

Para as práticas de restauração, recorreu-se aos apontamentos e ensaios elencados por Schroth *et al.* (2004) e Silva (2002) que visam proporcionar a estabilidade ecossistêmica e a restauração ecológica com base nas confluências do geótopo em questão. Contou-se também com uma revisão do plano de manejo do parque e a execução de procedimentos técnicos que auxiliem a estabilidade de taludes.

Resultados

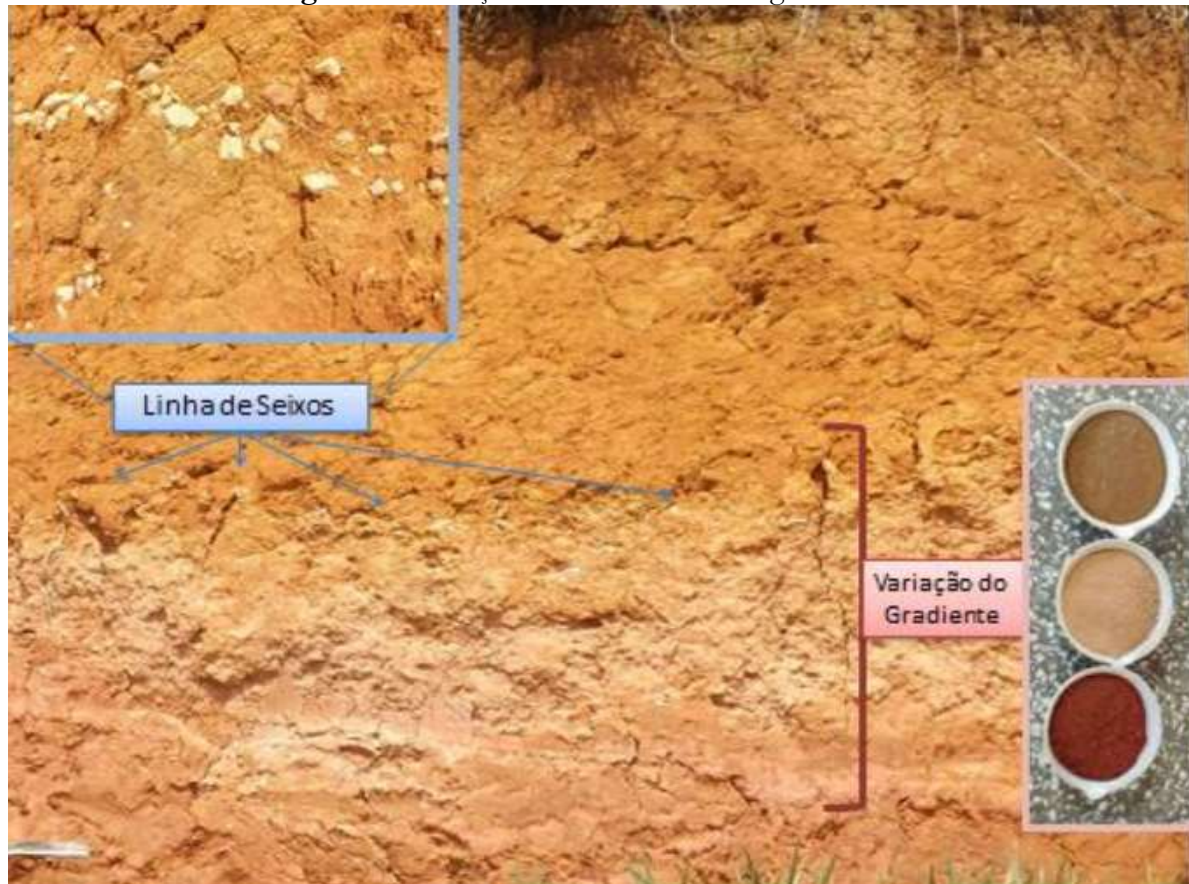
A apresentação dos resultados será realizada em dois eixos temáticos que circundam a pesquisa sendo estes; a avaliação dos ensaios físicos e granulométricos e os processos de monitoramento e práticas de restauração florestal empregadas com a finalidade de catalisar a estabilidade da vertente do recorte de estudo.

A dinâmica pedológica do PNMAR está diretamente atrelada com os fatores de formação do solo (Lepsch, 2002) bem como as condições topográficas do ambiente. Inserido nos mares de morro aos pés da Serra da Mantiqueira, há certa congruência em relação a ambientes de formação dos argissolos.

Conforme o mapeamento presente no plano de manejo, há como determinação a ocorrência em quarto nível categórico de Argissolos Vermelho-Amarelo distrófico saprolítico (PVAdf5). Tais fatores estão acordados com as cartas avaliadas, entretanto, o questionamento em função da classificação se dá pela dinâmica observada no horizonte diagnóstico B e C.

Apoiado pela carta de Munsell, foi diagnosticado que o horizonte B na faixa de profundidade de 20 à 45cm possui tons ocres com os valores cromáticos e de matiz em 7.5YR 6/8 enquanto o horizonte C na profundidade de 1,45 a 2,47cm apresenta como valores 5YR 7/8. O questionamento em função da classificação se dá pela apresentação do horizonte diagnóstico B aproximada às designações de um Argissolo amarelo. Todavia, entende-se que a classificação do mapeamento se apoiou na transição gradual entre esses horizontes, expressos pela figura abaixo (Figura 2), bem como a presença de uma angulosa e tímida linha de seixo fornecendo o caráter saprolítico, corrobora-se com a definição de Argissolo Vermelho-Amarelo ainda que com as ressalvas apresentadas como resultado.

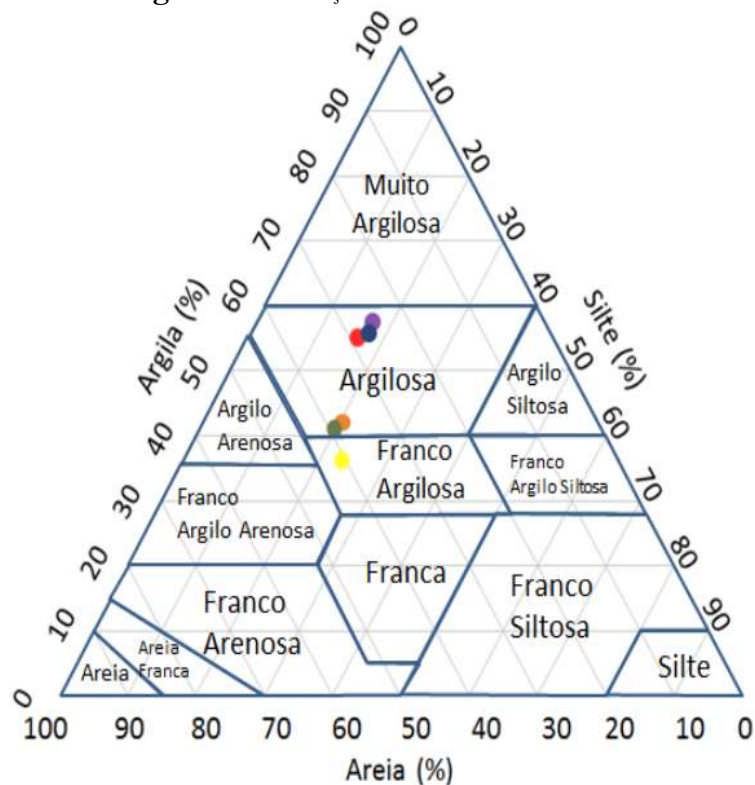
Figura 2 - Variação de Gradiente do Argissolo PVAdf5



Fonte: Autor (2020)

Os dados de ordem granulométrica foram obtidos através do método de pipetagem e das práticas empregadas no “manual de métodos de análises de solos”. A principal finalidade deste procedimento teve como escopo a averiguação dos teores de areia, silte e argila para a composição e classificação destes no triângulo textural (Santos *et al.*, 2013). Ressalta-se que as amostras correspondentes da topossequência recebem como sigla o ponto de coleta; topo (1), média encosta (2) e base (3) e em sequência apresenta-se as profundidades amostradas de 20 e 60cm formulando assim o triângulo textural apresentado (Figura 3).

Figura 3 - Variação Textural das Amostras



	P120	P160	P220	P260	P320	P360
Areia	28,76651	25,30739	37,49782	26,76672	40,54199	39,11665
Silte	16,05104	17,08134	20,37242	17,4545	23,20675	19,71401
Argila	55,18245	57,61127	42,12976	55,77878	36,25126	41,16935
Textura	Argilosa	Argilosa	Argilosa	Argilosa	Média-Argilosa	Argilosa

Fonte: Autor (2023).

As amostras P1, representando a parte superior da encosta avaliada, foram coletadas em diferentes profundidades em centímetros. Observa-se que as amostras superficiais, como P120, apresentam uma leve acumulação de argila em comparação com a amostra de maior profundidade (P160). Esse fenômeno se repete em todas as amostras, conforme esperado devido ao efeito eluvial, que resulta em um aumento da fração de areia à medida que o tamanho dos grânulos aumenta, devido à mobilidade vertical das partículas.

Portanto, é esperado que as amostras em maior profundidade apresentem uma proporção mais significativa de argila em comparação com as amostras superficiais, que por sua vez possuem uma maior quantidade de areia em relação às camadas mais profundas. Também é notada uma pequena variação de cerca de 1% no teor de silte entre as amostras P120 e P160.

Os pontos de coleta P220 e P260 estão localizados na média encosta, uma área que sofreu significativos efeitos do processo erosivo dentro do recorte de estudo. Em termos comparativos, a amostra superficial (P220) apresenta um aumento proporcional de aproximadamente 9% na

fração de areia em relação à amostra superficial do topo (P120). Esse fenômeno pode ser atribuído à forte tendência de deslocamento horizontal das areias em vertentes e à contínua mobilidade agravada pela erosão no recorte de estudo. Por outro lado, a amostra de maior profundidade (P260) não sofreu alterações exponenciais em sua proporção quando comparada à amostra de maior profundidade do topo (P160).

O diagnóstico realizado permite estabelecer uma conexão entre a ocorrência natural dos Argissolos e os processos erosivos presentes. Segundo Lepsch (2002), a maior suscetibilidade à erosão ocorre quando esses solos têm um horizonte B menos permeável, com acúmulo de argila. O diagnóstico indica possível perda de estabilidade física devido à maior proporção de areia, conferindo maior permeabilidade. No entanto, a presença de um horizonte inferior com alto teor de argila leva à saturação do material subjacente, alterando os limites físicos de plasticidade e induzindo à mobilidade do solo, contribuindo para os processos erosivos.

Esse parâmetro analítico é reforçado pela observação de condições empíricas, como a declividade superior a 30%, classificada como forte, a morfologia côncava-convergente e a presença de micaxistos do complexo pilar com moderada intemperização na geologia local. Além disso, outros fatores condicionantes, que serão analisados posteriormente, também exercem uma forte influência nos processos de mobilidade evidenciados.

A voçoroca presente nos pontos de coleta está em constante evolução. A granulometria tem uma relação direta com esse fenômeno. No entanto, outros pontos na mesma vertente podem ter a mesma granulometria ou até mais areia na média encosta. Portanto, a ocorrência específica da voçoroca nesse ponto é atribuída a outros fatores, como a retirada da cobertura vegetal nativa e o escoamento de água superficial da estrada de terra localizada no topo da voçoroca. (Ross *et al.*, 2022).

No terceiro ponto da sequência de amostragem, localizado na base da vertente, as amostras representativas são P320 (superficial) e P360 (subsuperficial). O critério de destaque neste ponto é a presença marcante de areia em ambas as amostras. As concentrações de areia nesses pontos reforçam a hipótese da mobilidade horizontal dos sedimentos do topo em direção à base da vertente, onde se depositam devido ao decréscimo da declividade.

No terceiro ponto amostral da topossequência, a baixa declividade indica uma zona de depósito. As amostras, especialmente a subsuperficial (P360), têm mais de 35% de argila, conferindo uma textura mais argilosa. Apesar disso, os fenômenos de infiltração, permeabilidade e correlação com processos de mobilidade de massa não se aplicam aqui, devido à baixa inclinação. Isso resulta em um solo mal drenado e menos permeável em profundidade, mas com maior estabilidade física e menor suscetibilidade aos movimentos de massa.

A amostra superficial (P320) foi classificada como tendo uma textura de média a argilosa (média-argilosa), pois excede apenas 1,25% da fração de argila necessária para ser considerada argilosa. Além disso, observa-se que essa amostra, por estar localizada na zona de depósito, detém as maiores proporções de areia e silte em toda a topossequência.

Enfatiza-se, portanto, a importância das análises granulométricas em três aspectos principais para a pesquisa: auxiliam na interpretação diagnóstica do comportamento do solo em vertentes, fornecem dados essenciais para as análises dos índices físicos e representam um importante condicionante geomorfológico para entender a suscetibilidade e fragilidade do ambiente frente aos processos erosivos (Slimane *et al.*, 2018).

Emprego da metodologia de índices físicos dos solos

Utilizam-se as designações dos índices físicos como um componente qualitativo para as informações obtidas nas amostras. A obtenção dos índices físicos do solo segue as metodologias estabelecidas pelas normas da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6459/17 e NBR 7180/16 (ABNT, 2016, 2017).

O caráter qualitativo dos índices físicos é derivado da aplicação de cálculos expressos em forma de índices, que passam a ser interpretados com ênfase no comportamento do solo em relação à consistência, plasticidade e liquidez.

O índice de consistência abrange um intervalo qualitativo que varia de "muito duros" a "muito moles". Uma forma de verificar manualmente essa condição é através da resistência dos torrões do solo ao esmagamento. No entanto, a qualificação da consistência não depende apenas do exame manual, mas está fundamentalmente vinculada aos valores quantitativos do índice.

Quanto aos parâmetros da liquidez, o índice reflete o comportamento da fração granulométrica de argila, classificando-a entre "argilas adensadas" e "argilas extra-sensíveis". As variações entre esses extremos de classificação estão relacionadas ao critério de adensamento, que se refere à porosidade baixa da amostra, e ao elemento de sensibilidade, relacionado à porosidade alta da amostra, o que afeta a difusão de água no solo.

O índice de plasticidade classifica o solo em diferentes níveis de plasticidade, variando de "muito pouco plástico" a "muito plástico", de acordo com sua resistência ao ser moldado e seu comportamento natural. A análise cronológica dos índices físicos é realizada na mesma série temporal para avaliar os resultados qualitativos e quantitativos das amostras coletadas no fragmento florestal do PNMAR.

O parâmetro de consistência

Ao analisar as variações dos índices presentes no quadro de classificação de consistência, é possível observar pontos cruciais que validam o comportamento das amostras.

Quadro 1 - Classes de Consistência

	Classificação de Índice de Consistência da Topossequência					
	Topo		Meio		Base	
	P120	P160	P220	P260	P320	P360
OUTUBRO	0,3977	0,8849	0,4198	0,8001	0,3589	0,7293
NOVEMBRO	0,2853	0,2919	0,3532	0,2724	0,4643	0,7986
DEZEMBRO	0,6971	0,5417	0,0868	0,0598	0,5347	0,5504
FEVEREIRO	0,3224	0,1523	-0,0431	-0,1595	0,3205	0,3285
ABRIL	0,4565	0,3204	0,0075	0,0307	0,414	0,5045
MAIO	0,5264	0,336	0,0645	0,1311	0,6542	0,7233
JUNHO	0,5057	0,4499	0,294	0,2804	0,6719	0,7359
SETEMBRO	0,7155	0,7498	0,4259	0,5977	0,7081	0,7466
Média das Amostras	0,488325	0,4658625	0,201075	0,2515875	0,515825	0,6396375
Legenda						
Muito Mole <0						
Mole 0 - 0,5						
Médio 0,5 - 0,75						
Rijo 0,75 - 1						
Muito Duro >1						

Fonte: Autor (2023).

Destaca-se o período de transição entre novembro e dezembro, onde ocorre uma alteração no comportamento da maioria das amostras, exceto a amostra superficial da média vertente (P220). Esse aumento na consistência, está diretamente relacionado com a forte incidência do déficit hídrico.

Após intensas chuvas em fevereiro, ocorre uma marcante variabilidade, resultando em amostras com comportamento mais mole. As amostras da média vertente foram as mais afetadas, sendo classificadas como "muito mole".

Outro aspecto interessante a ser avaliado é a regressão das amostras para classes com maior consistência. As amostras do topo e da base apresentam essa transição de forma antecipada em comparação com a média vertente. Essa correlação plausível está relacionada à drenagem no topo e à evaporação dos potenciais armazenados na base, visto que o aumento da consistência coincide com o início da estação seca.

Nas amostras da média vertente, percebe-se uma transição lenta na consistência, sendo a amostra superficial (P220) a primeira a apresentar essa mudança, de mole para média, em setembro de 2018. Essa transição pode ser atribuída à granulometria do solo, sugerindo uma origem

autóctone (Reis *et al.*, 2020). Consequentemente, a amostra de maior profundidade da média vertente (P260) mantém seu aspecto de consistência mole.

O parâmetro de plasticidade

A análise das classes obtidas a partir da variação dos índices de plasticidade possui grande relevância para a compreensão do comportamento das amostras, uma vez que reflete mudanças nos estados de plasticidade ao longo da vertente. Esse fator está diretamente relacionado aos condicionantes de erodibilidade do solo (Velasquez; Righes, 2019).

Nesta etapa, primeiramente, é avaliada a média dos fatores das amostras em cada ponto de coleta. Observa-se que as amostras do topo estão na classe de medianamente plásticas, as amostras da média vertente na classe de bem plásticas e as amostras da base na faixa de pouco plásticas.

Quadro 2 - Classes de Plasticidade

Classificação de Índice de Plasticidade da Topossequência						
	Topo		Meio		Base	
	P120	P160	P220	P260	P320	P360
OUTUBRO	4,246	2,423	8,5498	8,6419	3,5837	0,2706
NOVEMBRO	5,3505	7,4189	10,4741	11,1544	3,9794	4,8785
DEZEMBRO	6,5885	8,1172	10,1924	11,9581	5,3551	5,6556
FEVEREIRO	11,1792	11,0726	12,9632	10,8991	6,0193	6,7632
ABRIL	9,67	10,6154	11,2616	9,7923	5,9208	6,2157
MAIO	8,5479	8,3926	9,1815	8,9328	5,1501	5,6603
JUNHO	6,6102	6,2812	8,2514	8,4829	4,8029	4,8577
SETEMBRO	5,2854	5,8498	6,7115	7,7917	4,0049	4,146
Média das Amostras	7,184713	7,521338	9,698188	9,70665	4,852025	4,80595
Legenda						
Muito Pouco Plástico 1-3						
Pouco Plástico 3-6						
Medianamente Plástico 6-9						
Bem Plástico 9-12						
Altamente Plástico >12						

Fonte: Autor (2023).

Dois pontos de grande interesse são notados na análise do gráfico e do quadro. O primeiro ponto refere-se ao salto na plasticidade entre as amostragens de outubro de 2017 para novembro de 2017. O segundo ponto diz respeito ao progressivo incremento entre dezembro de 2017 e fevereiro de 2018.

Verifica-se que as amostras do topo e da base apresentam comportamento coerente com a plasticidade do material, principalmente nas amostras de profundidade (P160 e P360), que, ao mensurar os dados na segunda coleta amostral, sofrem um aumento no teor de umidade, alterando o comportamento das amostras de "muito pouco plástico" para "medianamente plásticas" no topo (P160) e de "pouco plástico" para a base (P360).

Essas variações estão correlacionadas com os altos índices pluviométricos, onde a amostra do topo (P160) apresenta um gradual desvio nos limites de consistência e liquidez, contribuindo para o aumento da plasticidade. A amostra da base (P360), devido à sua granulometria, exibe um leve desvio na consistência e liquidez, mas, devido à pressão exercida pelos materiais sobrejacentes da vertente, há um incremento na plasticidade (Sanchez *et al.*, 2009).

O segundo ponto crítico da análise é sobre as modificações ocorridas na vertente entre as amostragens de dezembro de 2017 e fevereiro de 2018. As alterações nos valores de plasticidade estão diretamente relacionadas ao aumento da pluviosidade, especialmente nas amostras do topo e média vertente.

As amostras do topo (P1) passam a exibir um comportamento plástico, com valores equivalentes para as amostras superficiais e de profundidade. Já as amostras da média vertente (P2) apresentam uma curiosa distinção entre a superfície (P220) e a profundidade (P260).

Em fevereiro de 2018, a amostra de profundidade (P260) mostrou uma leve queda no índice de plasticidade, mas ainda permaneceu na categoria "bem plástico". Ao compará-la com a amostra superficial (P220) no mesmo ponto da vertente, informações relevantes sobre a erodibilidade nos argissolos foram identificadas. A amostra superficial estava saturada de umidade, favorecendo os fenômenos que contribuem para a progressão da voçoroca na vertente, devido ao seu comportamento altamente plástico.

O parâmetro de liquidez

Em relação às classes de liquidez, observa-se uma homogeneidade em todas as amostras da topossequência, indicando um comportamento típico de argilas pré-adensadas. Esse comportamento ocorre quando o solo esteve sujeito a cargas maiores do que as atuais, caracterizando-o como pré-adensado (Caputo, 1996, p. 102). Essa condição é constante em todas as amostras, exceto nas amostras da média vertente em um momento específico.

Quadro 3 - Classes de Liquidez

Classificação de Índice de Liquidez da Topossequência						
	Topo		Meio		Base	
	P120	P160	P220	P260	P320	P360
OUTUBRO	0,6022	0,115	0,5801	0,1998	0,641	0,12
NOVEMBRO	0,7146	0,708	0,6467	0,7275	0,5356	0,2013
DEZEMBRO	0,3028	0,4582	0,9131	0,9401	0,4652	0,4495
FEVEREIRO	0,6775	0,8476	1,0431	1,1595	0,6794	0,6714
ABRIL	0,5434	0,6795	0,9924	0,9692	0,5859	0,4954
MAIO	0,4735	0,6639	0,9354	0,8688	0,3457	0,2766
JUNHO	0,4942	0,55	0,7059	0,7195	0,328	0,264
SETEMBRO	0,2844	0,2501	0,574	0,4022	0,2518	0,2533
Média das Amostras	0,511575	0,534038	0,798838	0,748325	0,479075	0,341438
Legenda						
Adensadas <0						
Pré-adensadas 0 - 0,99						
Normais =1						
Sensíveis 1- 1,5						
Extra-sensíveis >1,5						

Fonte: Autor (2023).

Esse momento mencionado coincide com um período de grandes mudanças na vertente, como evidenciado pelos desvios expressos no quadro, relacionados à pluviosidade em fevereiro, que afetou todas as amostras.

No entanto, as amostras da média vertente foram as únicas que apresentaram uma transição de argilas pré-adensadas para sensíveis. Esse evento é de grande importância, pois indica a expansão das argilas e, conseqüentemente, uma maior tendência à mobilidade do solo em vertente.

Além disso, há um ponto em que se nota uma rápida queda nos limites, indicando um caráter cíclico dos índices físicos. Esse ponto ocorre em setembro de 2018, devido à estação seca entre as coletas de junho e setembro.

Acompanhamento da progressão da voçoroca

Com o objetivo de apresentar os aspectos de alteração paisagística ocasionados pela progressão da voçoroca, realizou-se um registro fotográfico apresentado nesta seção em forma de mosaico (Figura 4). Esse mosaico tem como propósito ilustrar a evolução do processo erosivo observado em campo ao longo do período cronológico mencionado.

Figura 4 - Progressão Cronológica da Voçoroca



Fonte: Autor (2023).

Ao visualizar o mosaico fotográfico, fica evidente a progressão do processo erosivo em campo. A gestão do PNMAR tomou medidas para conter o avanço da erosão, incluindo o lançamento de uma extensa camada de serapilheira para proteger o solo, conforme registrado nas fotografias de outubro. No entanto, foi constatado que a erosão não estava restrita apenas à superfície.

Em novembro, parte da serapilheira inserida anteriormente já se deslocou, junto com uma quantidade significativa de substrato, inclusive com vegetação tombando. Em dezembro, toda a serapilheira e grandes porções de solo estão na base da voçoroca, que não possui mais um declive interno, assemelhando-se a um fosso.

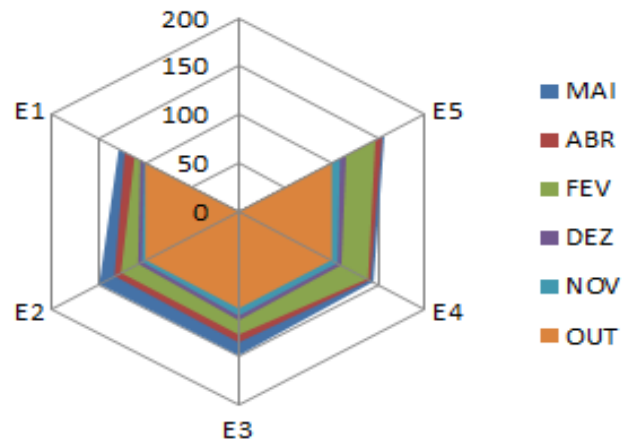
Em fevereiro, é notável uma maior umidade aparente do solo, com uma coloração mais escura, e um aumento na progressão das bordas e no colapso interno das paredes da voçoroca. Essas mudanças refletem o contínuo avanço do fenômeno erosivo no local. Em abril, observou-se um delineamento mais intenso na margem da estrada de terra, e por curiosidade, a profundidade da voçoroca foi medida, atingindo cerca de 7 metros.

A última imagem do registro evolutivo da voçoroca corresponde ao final de maio. Nessa foto, pode-se observar que uma parte significativa do material também foi deslocada, o que impediu o fluxo de veículos na estrada de terra e levou a gestão do PNMAR a tomar medidas estruturais.

Além do aspecto visual, como mencionado na metodologia da pesquisa, foram posicionadas 5 estacas a uma distância de 100 centímetros da borda da voçoroca. Em cada um dos registros fotográficos, uma trena foi usada para medir a distância da borda, fornecendo um parâmetro quantitativo que demonstra a progressão da voçoroca em escala cronológica.

Os dados coletados foram apresentados em um gráfico de área (Figura 5), destacando a progressão da voçoroca de forma visual e quantitativa.

Figura 5 - Gráfico de Progressão de Borda da Voçoroca.



Medição de Estacas em cm					
	<u>E1</u>	<u>E2</u>	<u>E3</u>	<u>E4</u>	<u>E5</u>
OUT	100	100	100	100	100
NOV	98,7	96,3	92,4	93,8	91,2
DEZ	94,3	92,1	87,6	89,7	84,7
FEV	88,2	73,7	72,9	61,2	53,4
ABR	77,8	66,8	64,8	58,6	46,1
MAI	71,3	50,3	51,6	55,3	43,6

Fonte: Autor (2023).

Com base nas medidas das cinco estacas de monitoramento (E1 a E5), foi possível acompanhar o deslocamento significativo da borda da voçoroca ao longo das fases amostrais, especialmente nos meses de fevereiro de 2018 e maio, período crítico mencionado anteriormente.

A combinação dos aspectos visuais e quantitativos da progressão da voçoroca foi essencial para compreender a erodibilidade em vertente. Essa abordagem, aliada à análise dos índices e limites físicos, permitiu conceber cenários de fragilidade e risco, orientando decisões para conter e restaurar áreas vulneráveis. Essa abordagem é crucial para a gestão adequada de áreas suscetíveis à erosão, possibilitando a implementação de medidas efetivas de preservação e recuperação ambiental.

Práticas de restauração

Diante da crescente progressão do processo erosivo em voçoroca na vertente, surgiu a necessidade de complementar as análises dos dados com a busca por caminhos que visassem a recuperação da estabilidade física da vertente e a restauração ambiental.

Em uma abordagem consultiva, foi elaborado em conjunto com a gestão do fragmento florestal um plano de restauração, no qual o PNMAR forneceria maquinário e mão de obra para realizar o manejo de solo na área afetada.

A Secretaria do Meio Ambiente optou pelas propostas de práticas sustentáveis para recuperar a voçoroca, priorizando a restauração orgânica aliada com o uso de maquinário. A inclinação da rampa não deve ultrapassar 45°, e o solo utilizado para preenchimento foi retirado da própria área afetada para evitar instabilidades devido a diferenças nos parâmetros granulométricos.

Em junho de 2018, foram iniciadas as medidas estruturais para resolver o problema da voçoroca. A primeira ação foi retirar o solo da estrada e depositá-lo na voçoroca, seguida pela terraplanagem do local, respeitando as relações topográficas e inclinação propostas. Todas as atividades estruturais foram realizadas pela gestão do PNMAR, enquanto a pesquisa concentrou-se em sugerir os parâmetros mais adequados para promover a restauração da estabilidade física do local de estudo.

Após a realização das medidas estruturais implementadas pela gestão do PNMAR, iniciou-se a formulação de um plano para restaurar os parâmetros de estabilidade da vertente. Para isso, foram consultados estudos e práticas de restauração ecológica e agroflorestal em fragmentos de mata atlântica, tendo como base as obras "Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes" de Schroth *et al.* (2004) e "Sistemas agroflorestais para a recuperação de matas ciliares em Piracicaba - SP" de Silva (2002). A proposta foi desenvolvida para favorecer a estabilidade física da vertente por meio da cobertura vegetal.

O feijão-guandu foi escolhido para a implementação devido à área de estudo ser uma zona de amortecimento anteriormente utilizada como pastagem. O objetivo era estabilizar a biomassa e promover uma vegetação primária, inibindo a expansão do capim *Brachiaria decumbens* presente na área.

Em 15/12/2018, foi preparado um substrato para o plantio, contendo sementes do feijão-guandu, substrato vegetal orgânico, porções de solo da vertente e sílica hidratada para absorver umidade. Pequenas cavas foram feitas na vertente para acomodar o amálgama vegetal, onde foram colocadas as sementes e a mistura de substrato. Também foi sugerido à gestão do PNMAR retomar a disposição de serapilheira para proteger o solo e fornecer biomassa para o crescimento das plantas.

Após o plantio, a primeira visita de acompanhamento ocorreu em 08/03/2019, com o objetivo de avaliar o desenvolvimento das plantas e verificar possíveis processos erosivos na área anteriormente afetada pela voçoroca. Durante a visita, foi observado um crescimento expansivo da *Brachiaria*, mas o crescimento dos amálgamas contendo o feijão-guandu foi limitado nas cavas.

Não foram identificados sinais de processos erosivos até aquela data, indicando um sucesso inicial do plantio na prevenção de deslocamentos de massa ou erosão superficial.

Para acompanhar o progresso da restauração da área, decidiu-se aumentar o intervalo entre as visitas de diagnóstico. Na segunda visita realizada em 22/11/2019, notou-se uma expressiva presença de Brachiarias em comparação ao feijão-guandu, porém a área encontrava-se bem estável nos aspectos paisagísticos, não apresentando sinais de erodibilidade na vertente (Figura 7).

Figura 7 - Visitas pós Plantio.



Fonte: Autor (2020).

Deve-se ressaltar que os processos de restauração exigem um extenso período cronológico, e embora a recomposição da paisagem tenha sido visível e avaliada ao longo desse curto período de 2 anos, é necessário considerar uma restauração mais abrangente e sistemática da área para garantir a efetividade a longo prazo. Isso é fundamental para futuros processos de monitoramento e manutenção, que devem ser realizados após a apresentação dos dados e atividades realizadas durante a pesquisa.

O foco principal foi dado ao favorecimento do feijão-guandu em detrimento das Brachiarias. No entanto, observou-se uma proliferação notável das Brachiarias na vertente afetada pela voçoroca. É essencial ressaltar que a presença de cobertura vegetal, mesmo com predominância de Brachiarias, é benéfica para o equilíbrio sistêmico do local de estudo. Essa cobertura vegetal contribui para a recuperação dos condicionantes geomorfológicos de erodibilidade em vertentes, permitindo uma restauração mais efetiva a longo prazo.

Considerações Finais

Esta pesquisa abordou de forma sistemática o estudo dos processos erosivos em vertentes, com foco na evolução de uma voçoroca em um fragmento florestal do PNMAR. Utilizando análise de índices físicos, observação visual e quantitativa, foram identificados os condicionantes do fenômeno. Os índices granulométricos foram essenciais para interpretar o comportamento do solo em vertentes, enquanto as classes de consistência, liquidez e plasticidade correlacionaram-se com a evolução da voçoroca, identificando períodos críticos de progressão erosiva.

Com base nos resultados, foi elaborado um plano de restauração da estabilidade física da vertente, usando técnicas de restauração ecológica e agroflorestal, com o feijão-guandu como planta estabilizadora, que mostrou resultados promissores para a contenção da erosão e recuperação da área. No entanto, o processo de restauração é complexo e exige monitoramentos e manutenções regulares para garantir a estabilidade a longo prazo.

A pesquisa contribuiu significativamente para o conhecimento dos condicionantes de erodibilidade em vertentes e o desenvolvimento de estratégias de restauração ambiental em áreas fragilizadas. As descobertas podem ser aplicadas em outras áreas com fenômenos erosivos similares, contribuindo para a preservação e sustentabilidade desses ambientes. Essa pesquisa representa um avanço importante no campo da geomorfologia, associado às metodologias de pedologia e geotecnia, na busca por soluções para problemas de erosão em ambientes naturais.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza do Brasil**: potencialidades paisagísticas. 7. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2012.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

- GUERRA, Antônio José Teixeira (colab.). **Dicionário de meio ambiente**. Rio de Janeiro: Thex Editora, 2009.
- GUERRA, Antônio José Teixeira; MARÇAL, Mônica dos Santos. **Geomorfologia ambiental**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015.
- HASUI, Yociteru; CREMONINI, Oscar A.; BORN, Helmut. Considerações sobre o Grupo Açungui em São Paulo e porção adjacente do Paraná. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33.,1984, Rio de Janeiro, RJ. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBG, 1984. v. 7, p. 3297-3306.
- LEPSCH, Igor F. **Formação e conservação dos solos**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- MORELLI, Ademir Fernando. **Atlas histórico do patrimônio ambiental de São José dos Campos**. São José dos Campos: FCCR, 2005.
- REIS, Alanah Alexandra Paiva dos; OLIVEIRA, Amanda Caldeira de; NASCIMENTO JÚNIOR, Jair Malta do; ROMUALDO, Juliane Cristina; ROMÃO, Laís Vieira. Comportamento geotécnico de uma Voçoroca localizada no Campus Alto Paraopeba, em Ouro Branco, MG. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 360-375, 2020.
- ROSS, Jurandyr Luciano S. Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMAs. *In*: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista da (org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 291-336.
- ROSS, Jurandyr Luciano S.; CUNICO, Camila; LOHMANN, Marciel; DEL PRETTE, Marcos Estevan (org.). **Ordenamento territorial do Brasil: potencialidades naturais e vulnerabilidades sociais**. Osasco, SP: Ed. dos Autores, 2022.
- SANCHEZ, Rodrigo B.; MARQUES JÚNIOR, José; SOUZA, Zigomar Menezes de; PEREIRA, Gener T.; MARTINS FILHO, Marcílio V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.
- SANTOS, Humberto G. dos; JACOMINE, Paulo Klinger T.; ANJOS, Lúcia Helena C. dos; OLIVEIRA, Virlei Álvaro de; LUMBRETERAS, José Francisco; COELHO, Mauricio R.; ALMEIDA, Jaime A. de; OLIVEIRA, João Bertoldo de; CUNHA, Tony Jarbas F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- SCHROTH, Götz; FONSECA, Gustavo A. B. da; HARVEY, Celia A.; GASCON, Claude; VASCONCELOS, Heraldo L.; IZAC, Anne-Marie N. **Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes**. Washington: Island Press, 2004.
- SILVA, Patrícia P. Vaz da. **Sistemas agroflorestais para a recuperação de matas ciliares em Piracicaba, SP**. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2002.
- SLIMANE, Abir Ben; Abir Ben Slimane; RACLOT, Damien; REBAI, Houda; LE BISSONNAIS, Yves; PLANCHON, Olivier; BOUKSILA, Fethi. Combining field monitoring and aerial imagery to evaluate the role of gully erosion in Mediterranean catchment (Tunisia). **Catena**, Amsterdam, v. 170, p. 73-83, Nov. 2018.

TEIXEIRA, Paulo César; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu; FONTANA, Ademir;
TEIXEIRA, Wenceslau Geraldês. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl.
Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VELASQUEZ, Rafaela Pohlmann; RIGHES, Afranio Almir. Controle de voçoroca em argissolo
vermelho em São Valentim-RS. **Disciplinarum Scientia: Naturais e Tecnológicas**, Santa Maria,
RS, v. 20, n. 1, p. 53-69, 2019.

Recebido em: 01 de agosto de 2023

Accito em: 08 de janeiro de 2024