

Efeito do estágio evolutivo de voçorocas na erosão do solo no bioma da mata atlântica, em Pinheiral – RJ

João Henrique Gaia Gomes¹ , Jean Sérgio Rosset² , Murilo Machado de Barros¹ , Conan Ayade Salvador¹ , Renato Sinquini de Souza¹ , Marcos Gervasio Pereira^{1*} 

1 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465 km7, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil

2 Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Unidade Universtária de Mundo Novo, BR 163 km, 20,2, Mundo Novo, Mato Grosso Sul, Brasil

*Autor para correspondência: mgersvasiopereira01@gmail.com

Recebido em 27 de outubro de 2023.

Aceito em 18 de janeiro de 2024.

Publicado em 8 de março de 2024.

Resumo - A erosão promove danos às lavouras, solo, assoreamento e poluição das bacias hidrográficas. Desse modo, objetivou-se avaliar a perda de nutrientes e de solo em diferentes estágios evolutivos de voçorocas na bacia hidrográfica do Ribeirão Cachimbal, Pinheiral - RJ. As voçorocas foram classificadas morfológicamente em inicial, juvenil, madura e senil. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na profundidade de 0,00-0,10 m na face interna de cada voçoroca. Procedeu-se análises para avaliação da fertilidade, carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds) e granulometria. Foi realizado um voo sistematizado utilizando um drone sobre as voçorocas para estimativa de suas respectivas áreas, em maio de 2017. A partir dos resultados de atributos químicos, físicos e das dimensões das voçorocas foram calculadas as quantidades de massa de solo e de nutrientes removidos. Os maiores valores de área, volume, Ds e massa de solo removidos foram quantificados na voçoroca em estágio senil (1069,23 m², 1709,35 m³, 1,28 Mg m⁻³ e 2187,97 Mg, respectivamente). Os maiores valores removidos de Ca²⁺ (46,22 kg) e de COT (482,18 kg) foram observados na voçoroca senil, já os de Mg²⁺ (15,09 kg) na juvenil e K⁺ e Na⁺ na voçoroca inicial (3,96 e 3,77 kg, respectivamente).

Palavras-chave: Perdas de solo. Indicadores de qualidade do solo. Degradação do solo.

Effect of the evolutionary stage of voçorocas on soil erosion in the atlantic forest biome, in Pinheiral – RJ

Abstract - Erosion causes damage to crops, soil, siltation and pollution of river basins. Thus, the objective was to evaluate the loss of nutrients and soil in different evolutionary stages of gullies in the Ribeirão Cachimbal watershed, Pinheiral - RJ. The gullies were morphologically classified into initial, juvenile, mature and senile. Deformed and undeformed samples were collected at a depth of 0.00-0.10 m on the inner face of each gully. Analyzes were carried out to evaluate fertility, total organic carbon (TOC), soil density (Ds) and granulometry. A systematic flight using a drone was carried out over the gullies to estimate their respective areas, in May 2017. Based on the results of chemical and physical

attributes and gully dimensions, the amounts of soil mass and nutrients removed were calculated. The highest values of area, volume, Ds and soil mass removed were quantified in the senile stage gully (1069.23 m², 1709.35 m³, 1.28 Mg m³ and 2187.97 Mg, respectively). The highest removed values of Ca²⁺ (46.22 kg) and TOC (482.18 kg) were observed in the senile gully, while those of Mg²⁺ (15.09 kg) in the juvenile gully and K⁺ and Na⁺ in the initial gully (3.96 and 3.77 kg, respectively).

Keywords: Soil losses. Soil quality indicators. Soil degradation.

Efecto de la etapa evolutiva de voçorocas sobre la erosión del suelo en el bioma del bosque atlántico, en Pinheiral – RJ

Resumen - La erosión causa daños a los cultivos, al suelo, sedimentación y contaminación de las cuencas fluviales. Así, el objetivo fue evaluar la pérdida de nutrientes y de suelo en diferentes estados evolutivos de cárcavas de la cuenca del Ribeirão Cachimbal, Pinheiral - RJ. Las quebradas se clasificaron morfológicamente en inicial, juvenil, madura y senil. Se recolectaron muestras deformadas y no deformadas a una profundidad de 0,00-0,10 m. Se realizaron análisis para evaluar fertilidad, carbono orgánico total (COT), densidad del suelo (Ds) y granulometría. Se realizó un vuelo con un dron sobre las cárcavas para estimar sus áreas, en mayo de 2017. Con base en los resultados de los atributos químicos y físicos y las dimensiones de las cárcavas, se calcularon las cantidades de masa de suelo y nutrientes removidos. Los mayores valores de área, volumen, Ds y masa de suelo removido se cuantificaron en la cárcava senil (1069,23 m², 1709,35 m³, 1,28 Mg m⁻³ y 2187,97 Mg, respectivamente). Los mayores valores eliminados de Ca²⁺ (46,22 kg) y COT (482,18 kg) se observaron en la cárcava senil, mientras los de Mg²⁺ (15,09 kg) en la juvenil y los de K⁺ y Na⁺ en la cárcava inicial (3,96 y 3,77 kg), respectivamente).

Palabras clave: Pérdida de suelo. Indicadores de calidad del suelo. Degradación del suelo.

Introdução

A erosão hídrica contribui de maneira significativa para a degradação dos solos no mundo e é considerada um dos principais fatores relacionados à sua perda e de nutrientes (Bogunovic *et al.* 2018). As alterações nas características do solo estão associadas ao seu uso, ao efeito de processos erosivos, à estrutura e são influenciadas pela sua textura. A etapa inicial da erosão hídrica, ocorre com a incidência das gotas de chuva sobre a superfície do solo, promovendo a destruição dos agregados associada ao salpicamento das partículas individualizadas (Mhazo *et al.* 2016). Em seguida, ocorre a ação conjunta do escoamento superficial, originado pelo acúmulo de água na superfície do solo devido a redução da capacidade de infiltração, e da gravidade, as quais transportam as partículas do solo, matéria orgânica e nutrientes para a parte mais baixa da vertente (Oliveira *et al.* 2023a; Bocuti *et al.* 2019). Toda essa dinâmica é condicionada pela ação da chuva, tipo e uso e ocupação do solo, topografia e tem como principais consequências a degradação ambiental, a diminuição da fertilidade do solo, a redução na infiltração e na capacidade de armazenamento de água, a sedimentação de reservatórios e rios, a poluição da água, a destruição de ecossistemas e o aumento das enchentes (Zhang *et al.* 2018).

Os processos erosivos podem ter início na forma de entressulcos (erosão difusa ou laminar) e evoluírem para a forma em sulcos (erosão linear ou concentrada), até atingirem o estágio mais avançado, denominado de voçoroca (Rubira *et al.* 2016; Oliveira *et al.* 2018). Na erosão em entressulcos o impacto da gota da chuva no solo é o principal fator responsável pela desagregação de suas partículas, devido as forças de pressão e cisalhamento liberados pela energia cinética no ponto de impacto, sendo o transporte das partículas realizadas por um fluxo laminar raso (Cassol e Lima 2003; Wang *et al.* 2022). Por outro lado, a erosão em sulco se desenvolve quando a erosividade da chuva e do escoamento superficial formado é maior do que a erosividade do solo (Zuo *et al.* 2022). As voçorocas, consideradas a expressão mais agressiva da erosão do solo, podem ser definidas considerando aspectos dimensionais, ou considerando os processos distintos em sua formação como fluxos superficiais, subsuperficiais e fluxos induzidos por ação antrópica, não havendo consenso absoluto entre estudiosos (Oliveira *et al.* 2023b). As voçorocas possuem diferentes padrões geomorfológicos, o que possibilita sua classificação quanto ao estágio evolutivo e à morfologia em inicial, juvenil, madura e senil (Dobek *et al.* 2011; Gaia-Gomes *et al.* 2020).

Nos estudos de erosão do solo, os métodos convencionais de quantificação de perdas de solo e de nutrientes a campo geralmente possuem custo e tempo de obtenção de informações elevados (Krenz *et al.* 2019). A integração de modelos existentes de erosão do solo com dados de campo e dados fornecidos por meio do uso de sistemas de informação geográfica (SIG) mostraram-se vantajosas (Viel *et al.* 2017), pois permite a realização dos levantamentos com maior frequência, menor quantidade de recursos, alta resolução e garantia de agilidade e precisão na coleta de informações (Nobajas *et al.* 2017; Krenz *et al.* 2019). Diversos estudos apontam que o uso de imagens de drones de diferentes períodos pode ser utilizado para avaliar de forma eficiente a intensidade e evolução da erosão ao longo dos anos, contribuindo assim para o estudo dos impactos ambientais e da suscetibilidade à erosão (Cândido *et al.* 2020; Zhou *et al.* 2023).

A utilização de diversos equipamentos como o receptor GPS geodésico (que utiliza o Sistema de Posicionamento Global – GPS), veículo aéreo não tripulável e georadar em pesquisas relacionadas à degradação dos solos vem crescendo mundialmente (Tedesco *et al.* 2014; Souza *et al.* 2017). Os resultados obtidos com o auxílio dessas ferramentas podem viabilizar várias ações de recuperação de áreas degradadas, estudos de impactos ambientais e de susceptibilidade do solo à erosão. Em estudo da erosão do solo na bacia hidrográfica do rio Darro, Fernandez *et al.* (2018) utilizaram SIG para processamento de informações pedoambientais. Os autores verificaram que o uso de geotecnologias possibilitou o adequado mapeamento da fragilidade ambiental e subsidiou a elaboração do plano de gestão da bacia hidrográfica e da restauração florestal.

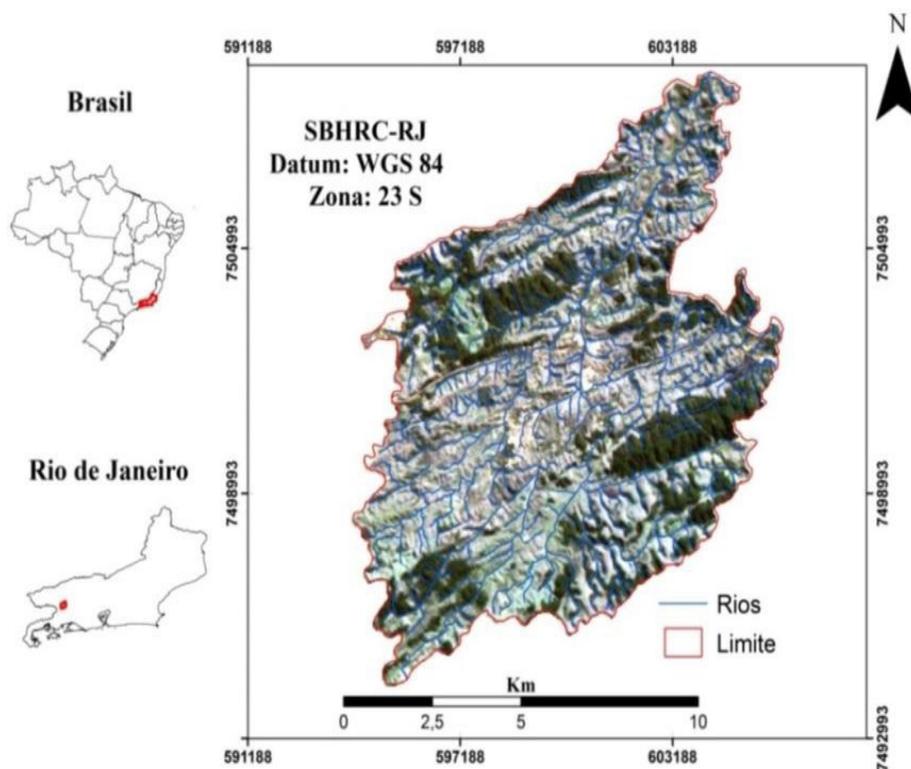
Nas últimas décadas houve aumento de interesse no estudo das voçorocas, entretanto, o uso de geotecnologias para avaliação da fragilidade do solo à erosão hídrica em áreas de ocorrência de voçorocas ainda é pouco explorado no Brasil. Dentre as regiões brasileiras com graves problemas de erosão, segundo Machado *et al.* (2010), destaca-se principalmente a região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, na região Sudeste, caracterizada pelo domínio morfoclimático Mar de Morros, no qual predomina relevo fortemente acidentado. Associado a isso, o histórico de ocupação iniciado no século XIX com o cultivo do café e substituído pela pecuária extensiva com uso de fogo intensificou a degradação do solo e o surgimento de voçorocas. A partir do exposto, presume-se que a perda de nutrientes e de solo varia em função do estágio evolutivo e da morfologia das voçorocas. Assim, os objetivos foram (i) quantificar os atributos físicos e químicos das voçorocas; (ii) estimar a área das

voçorocas com fotografias aéreas obtidas com um drone; (iii) estimar as quantidades de solo e de nutrientes removidos por erosão; e (iv) classificar as voçorocas quanto aos estágios evolutivos.

Material e métodos

O estudo foi realizado na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Cachimbal, que compreende grande parte do território do município de Pinheiral-RJ. O município está inserido na região do Médio Paraíba Fluminense, e localiza-se entre as latitudes 22° 29' 03"S e 22° 35' 27"S e entre as longitudes 43°54'49" W e 44°04'05" W (Figura 1).

Figura 1. Sub-bacia hidrográfica do ribeirão Cachimbal, Pinheiral - RJ.



O clima foi classificado como Cwa - clima temperado de inverno seco e verão chuvoso, e Am - clima tropical chuvoso com inverno seco segundo Koppen (Alvares *et al.* 2014), com precipitação média anual variando entre 1300 a 1500 mm ano⁻¹. A sub-bacia possui a altitude variando de 360 metros até 720 metros na serra do Arrozal, com cerca de 72% da sub-bacia correspondendo a encostas com declives, 22,3 % a várzeas estreitas e 5,7% zonas de topo de morro (Santos *et al.* 2016).

Os solos predominantes na sub-bacia do ribeirão Cachimbal são: na encosta os Argissolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos, e no topo e terço superior da encosta os Latossolos Vermelho-Amarelos (Santos *et al.* 2017).

A região tem como vegetação original a Floresta Estacional Semidecidual Submontana, que no período colonial, através do intenso uso e ocupação, foi submetida às alterações sendo a vegetação nativa substituída pela cultura do café. Atualmente a cobertura vegetal predominante é constituída

por pastagens, implantadas e espontâneas não manejadas, com diferentes estágios de degradação (Silva *et al.* 2021).

No interior da sub-bacia foi selecionada uma vertente de exposição (Figura 2) de acordo com os resultados apresentados no estudo de Gaia-Gomes *et al.* (2020), com quatro voçorocas localizadas em feição de topografia (pedoforma) convexa. As voçorocas foram classificadas quando à sua morfologia, em inicial, juvenil, madura e senil.

O **estágio inicial** caracteriza-se pelo início do desenvolvimento dos sulcos devido à ação conjunta do escoamento superficial concentrado, declividade, precipitações pluviométricas, tipo de cobertura do solo e estrutura do solo, em um perfil irregular, com seção transversal em V, e paredes retilíneas não apresentando ramificações; para o **estágio juvenil** o processo de erosão se intensifica ocasionando formação de dutos, provocando alongamento, alargamento e aprofundamento do canal; o **estágio maduro** a feição apresenta ramificações com linhas irregulares, podendo apresentar seção transversal em U e fundo achatado, podendo ser observado movimentação de massa nas paredes, com alargamento e erosão vertical nas ramificações, além de desenvolvimento de cobertura vegetal no fundo e acomodamento dos processos erosivos; já no **estágio senil** a voçoroca apresenta leito com seção transversal em forma de U, linha de contorno pouco irregular, paredes com inclinação suave, cobertura vegetal em toda a área e leito coberto com depósitos aluviais, onde segundo autores inicia-se o processo de estabilização, com a colonização de espécies vegetais provenientes dos escorregamentos de massas do solo (Oka-Fiori e Soares 1976; Fendrich *et al.* 1991; Dobek *et al.* 2011; Gaia-Gomes *et al.* 2020).

Figura 2. Vertente de exposição selecionada e a disposição das voçorocas, onde: 1 – Madura, 2 – Senil, 3 – Juvenil, 4 – Inicial. Fonte: João Henrique Gaia Gomes (2017).



Para avaliação dos atributos químicos e físicos das voçorocas foram coletadas amostras deformadas e amostras indeformadas com auxílio de um anel de Kopectk na profundidade de 0,00 - 0,10 m, na

face interna de cada voçoroca. Na voçoroca classificada como inicial, foram coletadas 10 amostras deformadas e 10 indeformadas, na juvenil 12 amostras deformadas e 12 indeformadas, na madura 16 amostras deformadas e 16 indeformadas e na senil 18 amostras deformadas e 18 indeformadas para as profundidades analisadas amostragem essa considerada para que todas as dimensões das voçorocas fossem abrangidas.

Foram realizadas as seguintes análises: a) Ca^{2+} e Mg^{2+} (cmolc dm^{-3}) trocáveis extraídos com KCl 1 mol L^{-1} , analisados por titulometria; b) K^{+} e Na^{+} (cmolc dm^{-3}) extraídos pelo método Mehlich-1 e analisados por fotometria de chama, respectivamente; c) carbono orgânico total (COT) (g kg^{-1}) pela oxidação via úmida, com dicromato de potássio. O método utilizado para a determinação do carbono orgânico encontra-se descrito em Yeomans e Bremner (1988), e os demais em Teixeira *et al.* (2017).

Foi realizada a análise granulométrica para quantificar as seguintes frações do solo: areia total, areia grossa, areia fina, argila total, argila natural e silte, todos expressos em (g kg^{-1}), de acordo com Teixeira *et al.* (2017). A determinação da densidade do solo (Ds) foi realizada após a coleta, sendo as amostras secas em estufa a 105°C até atingirem peso constante e retiradas após 24 horas (Teixeira *et al.* 2017).

Foi realizado um voo sistematizado com posicionamento definido previamente utilizando o drone modelo Phantom 4 PRO (SZ DJI Technology Co, Ltd) sobre a vertente de exposição na qual se encontram as voçorocas estudadas a fim de levantar dados de morfologia (volume e área). No voo foram capturadas 84 imagens, posteriormente utilizadas na aerotriangulação de pontos chaves para montagem da cena da área, com 4 cm de resolução espacial, e assim obtendo uma ortofoto da área. O voo foi realizado em maio de 2017. A partir da aerotriangulação foi gerada uma nuvem de pontos de modo a preencher o volume, corte e aterro, em toda a superfície das voçorocas. Por meio do software Pix4Dmapper (Pix4D SA, Switzerland) foram estimados o volume (m^3) e a área (m^2).

Com os dados de Ds obtidos na análise de solo e o volume das voçorocas obtidos por meio do software Pix4Dmapper, foi estimada a massa de solo removida. De posse da massa total removida em cada voçoroca foi realizada a quantificação da perda de nutrientes e dos componentes granulométricos, ambos denominados atributos edáficos, conforme a Eq. 1:

$$MAER = \frac{MSTR * \text{Atributo Edáfico}}{100\%} * 1000 \quad (1)$$

em que,

MAER: Massa do atributo edáfico removida, em Megagrama (Mg).

MSTR: Massa de solo total removida, em Megagrama (Mg).

Resultados e discussão

Os valores para os atributos área, volume, Ds e massa de solo removida são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos edáficos quantificados nas diferentes voçorocas.

Estágio	Área (m ²)	Volume (m ³)	Ds ¹ (Mg m ⁻³)	Massa de Solo Removida (Mg)
Inicial	54,83	32,44	1,12	36,33
Juvenil	117,97	79,41	1,05	83,38
Madura	934,28	1637,93	1,14	1867,24
Senil	1069,23	1709,35	1,28	2187,97

1 Ds: densidade do solo.

Com relação à área das voçorocas, o aumento verificado entre os estágios evolutivos inicial (54,83 m²) e senil (1069,23 m²) foi de 18,5 vezes a área da voçoroca inicial. O maior aumento de área entre estágios subsequentes ocorreu entre o estágio juvenil ao maduro (6,92 vezes maior). A partir do estágio maduro o aumento de área é menos intenso com 14,44%, o que indica menores taxas de perda de solo. Padrão similar foi observado para o volume sendo o menor, 32,44 m³, no estágio inicial e o maior de 1709,35 m³ no senil, o que um aumento de 51,56 vezes referente ao volume do estágio inicial.

Quanto à massa de solo removida, o menor valor de 36,33 Mg foi quantificado na voçoroca inicial e o maior de 2187,97 Mg na senil, o que representa aumento expressivo na perda de solo em função do desenvolvimento da voçoroca. Esse padrão pode estar associado à maior suscetibilidade dos solos à erosão hídrica associada à baixa cobertura do solo e à falta de intervenção nas voçorocas, o que favorece o desprendimento e o carreamento das partículas do solo, sendo estas depositadas em diferentes locais na paisagem. Ao analisarem a perda de solo e de nutrientes em voçorocas com e sem intervenção na mesma região desse estudo, Machado *et al.* (2010) verificaram remoção de volumes de solo de respectivamente 6,50 m³ e 10,71 m³, o que representa 39,30% de redução das perdas de solo quando feita a intervenção conservacionista.

O padrão erosivo observado também pode estar relacionado à vertente de exposição, e à escala temporal de ocorrência dos estágios, visto que nos estágios iniciais podem ocorrer menores perdas de solo, e com o decorrer do processo, desde que medidas de contenção não sejam tomadas, gradativamente ocorre o aumento da voçoroca e da perda de solo. Segundo Golosov *et al.* (2017), o transporte de sedimentos provenientes dos processos erosivos é diretamente dependente da escala espacial e do uso do solo. Adicionalmente, as pedoformas convexas da região de estudo encontram-se sob ação constante de processos erosivos, que atuam diretamente na degradação do solo, o que aumenta a perda de solo, de água e de nutrientes (Tavares *et al.* 2017; Bogunovic *et al.* 2018).

Quanto aos atributos físicos do solo os menores valores de massa removida devido ao processo erosivo foram verificados na voçoroca em estágio senil e os maiores valores constatados no estágio juvenil, com exceção da areia total e areia grossa, com maior valor no estágio inicial (Tabela 2).

Em relação aos atributos químicos do solo, os menores valores de massa de solo removida no estágio inicial, com exceção do K⁺ e o Na⁺ que tiveram o comportamento contrário, apresentando seus maiores valores de massa removida no estágio inicial.

Quanto aos atributos físicos do solo, os menores valores de massa removida devido ao processo erosivo foram verificados na voçoroca em estágio classificado como senil, já os maiores valores foram verificados no estágio juvenil com exceção da areia total e da areia grossa que apresentaram seus maiores valores no estágio inicial.

Tabela 2. Massa dos atributos químicos (kg) e físicos (Mg) do solo removido.

Estágio	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	COT
Inicial	7,45	4,60	3,96	3,77	227,02
Juvenil	43,62	15,09	1,32	0,81	463,35
Madura	44,43	13,34	1,29	0,82	400,14
Senil	46,22	13,27	1,37	0,82	482,18
	Areia Total	Areia Fina	Areia Grossa	Argila Total	Argila Natural
Inicial	18,60	4,13	14,47	10,59	3,77
Juvenil	18,43	4,34	13,89	12,57	4,60
Madura	16,91	3,57	13,28	11,09	4,16
Senil	15,58	3,51	12,06	9,02	3,66

Quanto aos atributos químicos, os valores de Ca²⁺ e COT variam de 7,45 a 46,22 kg e 227,02 a 482,18 kg, respectivamente, com os menores valores associados à voçoroca em estágio inicial e os maiores a senil. Os menores valores observados na voçoroca em estágio inicial podem ser decorrentes do processo encontrar em sua fase inicial não tendo ainda havido tempo para uma grande remoção de nutrientes. Quanto a voçoroca em estágio senil, nessa se observa a ocorrência de espécies arbóreas e arbustivas na área, que além de contribuir com o processo de estabilização favorecer a adição de matéria orgânica na forma de serapilheira, contribuindo para o aporte de carbono orgânico e nutrientes ao solo. Coutinho *et al.* (2017), em estudos realizados no município de Pinheiral verificou que em áreas abandonadas, inicia-se o processo de sucessão, sendo esse também observado em voçorocas.

O maior valor de Mg²⁺ removido (15,09 kg) foi observado na voçoroca classificada como juvenil, e o menor (4,60 kg) na inicial. Esse padrão pode estar relacionado ao fato desse elemento ser facilmente perdido principalmente adsorvido junto com sedimentos, via escoamento superficial (Pinheiro *et al.* 2010).

Com relação ao K⁺ e ao Na⁺ os maiores valores foram verificados na voçoroca inicial, sendo eles respectivamente, 3,96 kg e 3,77 kg. Já para os menores valores os de K⁺ (1,29 kg) para a voçoroca madura e os de Na⁺ (0,81 kg) na juvenil. Os maiores valores quantificados para esses elementos podem ser atribuídos a sua grande mobilidade no solo, estando associados a voçorocas em menor grau de degradação, que apresentam maiores quantidades de minerais primários facilmente intemperizáveis que podem contribuir para o fornecimento desses elementos por intemperismo. À medida que vai havendo a remoção de massa, a quantidade de minerais primários que apresentem esses íons em sua composição vai diminuindo, culminando com menores valores desses no material que é transportado, o que pode ser verificado nas voçorocas com diferentes graus de desenvolvimento.

Quanto aos atributos físicos a areia fina e argila natural terem apresentados os maiores valores na voçoroca classificada como juvenil, o padrão pode ser decorrente do processo estar em um estágio inicial ocorrendo em maior intensidade favorecendo a remoção dessas frações de menor granulometria de areia e a argila naturalmente dispersa. Os maiores valores para a argila total foram encontrados na voçoroca madura, em função do maior tempo de transporte e deposição de material, contribuindo para o aumento dessa fração granulométrica. Os maiores valores de argila total foram quantificados a jusante da voçoroca.

Os menores valores de massa de atributos físicos removidos verificados na voçoroca em estágio senil podendo estarem associados, ao seu padrão morfológico, o qual apresenta paredes com inclinação

suave, favorecendo ao escoamento superficial mais lento, e cobertura vegetal em toda a área e leito coberto com depósitos aluviais (Gaia-Gomes *et al.* 2020), tais características contribuem para a estabilização dos processos erosivos com a colonização de espécies vegetais oriundas do deslizamento de massa.

O maior teor de areia total removido foi de 18,60 Mg, com 14,47 Mg dessa massa correspondente a areia grossa, verificados na voçoroca em estágio inicial. Esse padrão pode estar relacionado ao efeito do escoamento superficial e subsuperficial da água, que ocorre de forma mais intensa. A fração areia apresenta baixa coesão, pode ser facilmente transportada. Solos com teores mais elevados de areia grossa apresentam uma menor agregação, e quando os agregados estão presentes possuem uma pequena resistência ao impacto das gotas de chuva, sendo mais suscetíveis à desagregação. Tais características associadas ao histórico de uso da terra e a declividade favorecem ao início do processo erosivo (Zhang *et al.* 2018).

A presença de cobertura vegetal atua como barreira física no escoamento das partículas do solo, o que pode ser observado na voçoroca em estágio senil, que se encontra em regeneração espontânea. Autores como Peñuela *et al.* (2015) que estudaram o efeito da inclinação e da rugosidade na conectividade de fluxo terrestre em escala de parcela, e, Zhang *et al.* (2018) que avaliaram os efeitos dos fatores topográficos no escoamento e perda de solo no sudoeste da China, consideram que a cobertura vegetal influencia diretamente na intensidade de erosão hídrica.

Para os atributos areia fina, argila natural e argila total os maiores valores foram respectivamente, 4,34 Mg, 4,60 Mg e 12,57 Mg, verificados na voçoroca classificada como juvenil, que segundo Gaia-Gomes *et al.* (2020) é nesse estágio que o processo de remoção de sedimentos ocorre intensamente havendo elevado carreamento de partículas.

Esse padrão também pode ser explicado pelo processo ativo de alteração estrutural que ocorre nessa classe de voçoroca, na qual o processo erosivo se intensifica, ocorrendo a evolução da feição erosiva e formação de dutos, alongamento, alargamento, aprofundamento do canal e grande carga de energia cinética, o que promove consequentemente a desagregação do solo e o carreamento de partículas de menor diâmetro e de baixa densidade, já que devido ao seu tamanho necessitam de menos energia cinética para o seu transporte.

Ao analisar os valores encontrados para a densidade do solo (Ds), verifica-se padrões distintos entre as voçorocas, sendo o menor valor observado na voçoroca em estágio juvenil ($1,05 \text{ Mg m}^{-3}$) e o maior para o estágio senil ($1,28 \text{ Mg m}^{-3}$).

A Ds é um reflexo das características estruturais dos solos, o que possibilita prever a expressão de processos erosivos (Correa *et al.* 2014). A voçoroca em estágio senil possui maiores dimensões, sendo a mais profunda em comparação a juvenil, que se encontra com leito mais raso e com leve inclinação, esse fato pode estar influenciando em valores mais baixos de Ds, visto que, estes tendem a aumentar em profundidade, em função do adensamento ocorrido pela pressão exercida pelas camadas superiores sobre as subjacentes reduzindo a porosidade e provocando a compactação.

Conclusão

Com o avanço do estágio evolutivo das voçorocas pode-se estimar, para o local de estudo, o aumento crescente da perda de solo e de nutrientes. Verificou-se que o teor de areia total, com participação expressiva da areia grossa, é removido com maior intensidade no estágio inicial, e no

estágio seguinte, juvenil, ocorreu as maiores perdas da areia fina e argila natural, sendo no estágio maduro observado as maiores perdas de argila total, e no estágio senil constato as menores modificações nas propriedades físicas. Adicionalmente, as estimativas de área, volume e massa de solo removida das voçorocas expressaram valores que corroboram com o avanço no processo erosivo. No tocante aos atributos químicos, foi verificado que houve perdas expressivas de K^+ e Na^+ na voçoroca em estágio inicial, de Mg^{2+} no juvenil, e de Ca^{2+} e carbono no senil. A partir do exposto, tais valores demonstram a cronologia do processo de degradação do solo sob o ponto de vista físico e químico, como também o início da estabilização da voçoroca no estágio mais avançado.

Participação dos autores: JHGG – Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Metodologia e Redação – rascunho original e revisão; JSR, MMB – Conceituação, Análise formal, Metodologia e Redação – rascunho original; CAS – Conceituação, Análise formal, Metodologia e Redação – revisão e edição; RSS – Metodologia e Redação – rascunho original; MGP – Captação de recurso, Administração de Projeto, Supervisão, Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Metodologia e Redação – revisão e edição.

Aprovação ética ou licenças de pesquisa: Não se aplica

Disponibilidade dos dados: Manuscrito oriundo da tese de doutorado está disponível no repositório da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Link: <https://tede.ufrrj.br/jspui/handle/jspui/6082>

Fomento: Faperj.

Conflito de Interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, De Moraes Gonçalves JL, Sparovek G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6):711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Bocuti ED, Amorim RSS, Santos TG, Di Raimo LAL, Pereira HG. 2019. Interrill erodibility and its relationship with attributes of Cerrado soils. *Revista de Ciências Agrárias* 42(1):68-78. <https://doi.org/10.19084/RCA18130>
- Bogunovic I, Pereira P, Kusic I, Sajko K, Sraka M. 2018. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *Catena* 160:376-384. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.009>
- Cândido BM, James M, Quinton J, Lima W, Silva MLN. 2020. Sediment source and volume of soil erosion in a gully system using UAV photogrammetry. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200076>
- Cassol EA e Lima VS. 2003. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38(1):117-124. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000100016>
- Correa EA, Moraes IC, Guedes Junior E, Couto Junior A, Pinto SAF. 2014. Resistência à penetração e densidade do solo como indicadores na análise da susceptibilidade a erosão hídrica dos solos. *Revista Geonorte* 10:141-146.
- Coutinho FS, Pereira MG, Tostes JO, Francelino MR, Gaia-Gomes JH. 2017. Application of Georadar in Areas with Different Vegetation Cover. *Floresta e Ambiente* 24:1-8. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.001116>
- Dobek K, Demczuk P, Rodzik J, Holub B. 2011. Types of gullies and conditions of their development in silvicultural loess catchment (Szczepczeszyn Roztocze region, Poland). *Landform Anal* 17:39-42.
- Fendrich R, Oblanden NL, Aisse MM, Garcias CM. 1991. Drenagem e controle da erosão urbana. 442 p.

Fernandez P, Delgado E, Lopez-Alonso M, Poyatos JM. 2018. GIS environmental information analysis of the Darro River basin as the key for the management and hydrological forest restoration. *Science of the Total Environment* 613:1154-1164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.190>

Gaia-Gomes JH, Pereira MG, Francelino MR, Laranjeira JP. 2020. B. Physical and chemical attributes of soil on gully erosion in the Atlantic forest biome, *Revista Ambiente e Água* 15(1):1-15. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2459>

Gaia-Gomes JH, Pereira MG, Santos GL, Delgado RC. 2018. Physical Parameters of the Cachimbal River Sub-basin Associated to Landscape Change in Pinheiral-RJ, Brazil. *Bioscience Journal* 34(2):268-278. <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v34n2a2018-36959>

Golosov V, Collins AL, Tang O, Zhang X, Zhou P, He X, Wen A. 2018. Sediment transfer at different spatial and temporal scales in the Sichuan Hilly Basin, China: Synthesizing data from multiple approaches and preliminary interpretation in the context of climatic and anthropogenic drivers. *Science of the Total Environment* 598:319–329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.133>

Krenz, J, Greenwood P, Kuhn N. 2019. Soil degradation mapping in drylands using unmanned aerial vehicle (UAV) data. *Soil Systems* 33(3) 1-20. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020033>

Machado RL, Resende AS, Campello EFC, Oliveira JA, Franco AA. 2010. Soil and nutrient losses in erosion gullies at different degrees of restoration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34:945-954. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300036>

Mhazo N, Chivenge P, Chaplot V. 2016. Tillage impact on soil by water: discrepancies due to climate and soil characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 230:231-241. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.033>

Nobajas A, Waller RI, Robinson ZP, Sangonzalo R. 2017. Too much of a good thing? The role of detailed UAV imagery in characterizing large-scale badland drainage characteristics in South-Eastern Spain. *International Journal of Remote Sensing and Remote Sensing Letters* 38:2844–2860. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1274450>

Oka-Fiori C e Soares PC. 1976. Aspectos evolutivos das voçorocas. *Notícia Geomorfológica*. Campinas, Brasil. 32p.

Oliveira FF, Santos RES, Araujo RC. 2018. Erosive processes: dynamics, causing agents and conditioning factors, *Revista Brasileira de Iniciação Científica* 5(3):60-83.

Oliveira LD, Alves WS, Castro RM, Pereira MAB, Morais WA, Possa EM. 2023a. Estimativa da erosão hídrica em uma bacia hidrográfica no estado de Goiás (Brasil) por meio de modelagem e inteligência geoespacial. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16(1):81-100. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p081-100>

Oliveira MAT, Lemos R, Pinto LR. 2023b. Pode uma voçoroca resultar da evolução de voçorocas conectadas e desconectadas. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 24(3):1-35. <http://doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2372>

Peñuela A, Javaux M, Bièdiers CL. 2015. How do slope and surface roughness affect plot-scale overland flow connectivity? *Journal Hydrology* 528:192–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.031>

Pinheiro DTC, Costa CC, Motta LL, Godinho FC, Silva JV. 2010. Monitoramento da fertilidade do solo submetido à erosão hídrica em área cultivada com *Eucalyptus* sp. *Revista Agrogeoambiental* 2:57-65. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v2n12010252>

Rubira FG, Melo GV, Oliveira FKS. 2016. Proposta de padronização dos conceitos de erosão em ambientes úmidos de encosta. *Revista de Geografia* 33(1):169-193.

Santos GL, Pereira MG, Lima SS, Ceddia MB, Mendonça VMM, Delgado RC. 2016. Landform curvature and its effect on the spatial variability of soil attributes, Pinheiral-RJ/BR. *Cerne* 22:431-438. <https://doi.org/10.1590/01047760201622042184>

Santos GL, Pereira MG, Delgado R C, Moraes LFD. 2017. Padrões da regeneração natural na região de Mar de Morros, Pinheiral-RJ. *Revista Floresta e Ambiente* 24:1-11. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.008115>

- Santos JCN, Andrade EM, Medeiro PHA, Guerreiro MJS, Palácio HÁQ. 2017. Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. *Revista Ciência Agronômica* 48:251-260. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170029>
- Silva CF, Pereira MG, Pinto LASR, Teodoro AS, Fontes MA, Gaia-Gomes JH, Silva EMR. 2021. Soil attributes as indicators of the stabilization process of erosion in gullies at different formation stages in the southeast region of Brazil. *Ambiente e Água* 16(4):1-18. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2632>
- Souza NC, Pitombo C, Cunha AL, Larocca APC, Allmeida Filho GS. 2017. Classification model of gully erosion process along of railway line through Decision Tree algorithm and geotechnology. *Boletim de Ciências Geodésicas* 23(1):72-86. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702017000100005>
- Tavares AS, Júnior HM, Spalevic V, Mincato RL. 2017. Models of water erosion and soil loss tolerance in dystrophic oxisols in southern Minas Gerais. *Revista do Departamento de Geografia* 12:268-277. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0i0.132694>
- Tedesco A, Antunes AFB, Oliani LO. 2014. Gully erosion detection by hierarchical classification and tree decision. *Boletim de Ciências Geodésicas* 20(4):1005-102. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702014000400055>
- Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG. 2017. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. revista e ampliada. Embrapa. 573 p.
- Viel JA, Rosa KK, Hoff R. 2017. Estudo da erosão superficial do solo por meio de sig na região da denominação de origem vale dos vinhedos (Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia* 18(3):521-533. <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i3.1197>
- Wang Y, He W, Zhang T, Zhang Y, Cao L. 2022. Adapting the WEPP Hillslope Model and the TLS technology to predict unpaved road soil erosion. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(15):9213. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159213>
- Yeomans JC e Bremner JM. 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19:1467-1476.
- Zhang X, Hu M, Guo X, Yang H, Zhang Z, Zhang K. 2018. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China. *Catena* 160:394-402. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.013>
- Zhou X, Wei Y, He J, Cai C. 2023. Estimation of gully erosion rate and its determinants in a granite area of southeast China. *Geoderma* 429:116223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116223>
- Zuo Z, Wang H, Ding S, Wu Y. 2022. Effect of rill development on slope erosion and sediment yield based on stereophotogrammetry technology. *Water* 14(19):2951. <https://doi.org/10.3390/w14192951>



Esta obra está licenciada com uma *Licença Creative Commons Atribuição Não-Comercial 4.0 Internacional*.