

Degradação ambiental no semiárido: evidências baseadas em indicadores geomorfológicos, edáficos e vegetacionais no baixo curso do rio Pajeú (Pernambuco)

Isaías Duarte Nunes ^{1*}, Luana Bezerra da Silva ², Alissandra Trajano Nunes ³, Kleber Carvalho Lima ⁴

¹Mestrando em Saúde e Desenvolvimento Socioambiental, Universidade de Pernambuco, Brasil. (*Autor correspondente: isaias.nunes@upe.br)

²Mestranda em Saúde e Desenvolvimento Socioambiental, Universidade de Pernambuco, Brasil.

³Doutora em Biotecnologia e Recursos Ambientais, Universidade de Pernambuco, Brasil.

⁴Doutor em Geografia, Universidade de Pernambuco, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 17/04/2026 – Revisado em: 22/05/2026 – Aceito em: 24/06/2026

RESUMO

O processo de degradação ambiental em áreas semiáridas está associado a remoção da cobertura vegetal desencadeando dinâmicas erosivas, com alterações diretas no funcionamento da paisagem e dos ecossistemas. Assim, este estudo teve como objetivo analisar a degradação ambiental em um sistema erosivo localizado no baixo curso do rio Pajeú (PE), a partir da integração de variáveis geomorfológicas, edáficas e vegetacionais. Os procedimentos metodológicos combinaram sensoriamento remoto com Aeronave Remotamente Pilotada, análise geomorfológica das feições erosivas, elementos edáficos com teores de matéria orgânica e carbono orgânico do solo, levantamento florístico e estrutural da vegetação. Os resultados evidenciaram a predominância de solo exposto e elevada conectividade do escoamento superficial, associadas à ocorrência generalizada de erosão laminar e linear. A perda de solo refletiu-se no empobrecimento dos atributos edáficos, especialmente nos baixos teores de matéria orgânica e carbono orgânico nas áreas mais degradadas. A vegetação respondeu às variáveis edáficas, com distribuição espacial heterogênea, baixa diversidade e dominância de hiperxerófilas, além da ocorrência de bioindicadores geomorfológicos, como plantas em pedestal em áreas de solo exposto. Assim, os resultados indicam que a descontinuidade da cobertura vegetal desencadeia um ciclo de retroalimentação da degradação, no qual a intensificação da erosão, o empobrecimento do solo e as respostas da vegetação limitam a resiliência ambiental, reforçando a vulnerabilidade à desertificação no semiárido pernambucano.

Palavras-Chaves: Interdisciplinaridade, Desertificação, Erosão do solo, Caatinga degradada.

Environmental degradation in the lower Pajeú River (Pernambuco, Brazil): geomorphic, soil, and vegetation indicators

ABSTRACT

Environmental degradation in semi-arid regions is strongly associated with vegetation cover discontinuity and the intensification of erosive processes, with direct implications for landscape functionality and desertification. This study aimed to analyze environmental degradation in an erosive system located in the lower course of the Pajeú River (Pernambuco, Brazil), based on the integration of geomorphological, soil, and vegetation variables. The methodological approach combined remote sensing using a Remotely Piloted Aircraft, geomorphological analysis of erosive features, assessment of soil organic matter and organic carbon contents, and a floristic and structural survey of the vegetation. The results indicate a predominance of bare soil and high surface runoff connectivity, associated with the widespread occurrence of sheet and linear erosion. Continuous soil loss resulted in the depletion of soil attributes, particularly low organic matter and organic carbon contents in the most degraded areas. Vegetation responded to this degradation gradient, showing a heterogeneous spatial distribution, low diversity, and dominance of rustic and hyper-xerophilous species, as well as the occurrence of geomorphic bioindicators such as pedestal plants restricted to bare soil areas. Overall, the findings demonstrate that vegetation cover discontinuity triggers a degradation feedback cycle, in which erosion intensification, soil impoverishment, and vegetation responses limit environmental resilience, reinforcing vulnerability to desertification in the semi-arid region of Pernambuco.

Keywords: Interdisciplinarity, Desertification, Soil erosion, Degraded Caatinga.

Nunes, I. D., Silva, L. B. da, Nunes, A. T., & Lima, K. C. (2026). Degradação ambiental no semiárido: Evidências baseadas em indicadores geomorfológicos, edáficos e vegetacionais no baixo curso do rio Pajeú (Pernambuco). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 14(3), 100–112.



Direitos do Autor. A Revista Brasileira de Meio Ambiente utiliza a licença *Creative Commons* - CC BY 4.0.

Degradación ambiental en el semiárido: evidencias a partir de indicadores geomorfológicos, edáficos y vegetacionales en el bajo curso del río Pajeú (Pernambuco, Brasil)

RESUMEN

La degradación ambiental en regiones semiáridas está fuertemente asociada a la discontinuidad de la cobertura vegetal y a la intensificación de los procesos erosivos, con implicaciones directas para la funcionalidad del paisaje y la desertificación. Este estudio tuvo como objetivo analizar la degradación ambiental en un sistema erosivo localizado en el bajo curso del río Pajeú (Pernambuco, Brasil), a partir de la integración de variables geomorfológicas, edáficas y vegetacionales. El enfoque metodológico combinó el uso de sensores remotos mediante Aeronave Remotamente Pilotada, el análisis geomorfológico de las formas erosivas, la evaluación de los contenidos de materia orgánica y carbono orgánico del suelo, y un levantamiento florístico y estructural de la vegetación. Los resultados evidencian el predominio de suelo desnudo y una elevada conectividad del escurrimiento superficial, asociados a la ocurrencia generalizada de erosión laminar y lineal. La pérdida continua de suelo se reflejó en el empobrecimiento de los atributos edáficos, especialmente en los bajos contenidos de materia orgánica y carbono orgánico en las áreas más degradadas. La vegetación respondió de forma consistente a este gradiente de degradación, presentando una distribución espacial heterogénea, baja diversidad y dominancia de especies rústicas e hiperxerófilas, además de la ocurrencia de bioindicadores geomorfológicos, como plantas en pedestal, restringidos a las áreas de suelo desnudo. De manera integrada, los resultados indican que la discontinuidad de la cobertura vegetal desencadena un ciclo de retroalimentación de la degradación, en el cual la intensificación de la erosión, el empobrecimiento del suelo y las respuestas de la vegetación limitan la resiliencia ambiental, reforzando la vulnerabilidad a la desertificación en el semiárido pernambucano.

Palabras clave: Interdisciplinariedad, desertificación, erosión del suelo, degradación de la Caatinga.

1. Introdução

O processo histórico de ocupação do território brasileiro contribuiu para acentuar as fragilidades dos ambientes naturais, a exemplo dos ambientes semiáridos do sertão nordestino (Küster e Martí, 2006). No vale do rio Pajeú, afluente pernambucano do Rio São Francisco, o processo de colonização ocorreu em meados do século XVIII, sendo a principal atividade econômica a pecuária, desenvolvida em latifúndios, que se estendeu até o século XIX (Ferreira, 2011). A atividade pecuarista, desenvolvida de forma extensiva, demandava vastos espaços, o que levou a substituição da vegetação de Caatinga por pastagens praticando-se as queimadas, intensificando processos de degradação ambiental que persistem até a contemporaneidade (Montenegro, 2023).

Por degradação ambiental, entende-se como qualquer alteração adversa dos processos, funções ou componentes ambientais que causam impacto, podendo induzir a perda da sua capacidade de retornar ao estado natural (Sánchez, 2020). Nessa perspectiva, ambientes degradados podem se recuperar espontaneamente, contudo, a depender do grau de degradação, a sua resiliência pode ocorrer em espaço de tempo muito longo, ou mesmo, pode ser impossível de ocorrer sem intervenção humana (Andrade e Souza, 2016; Souza, Souza e Sousa, 2023).

Nesse contexto, em áreas de clima semiárido, os ambientes degradados apresentam limitações adicionais para a recuperação espontânea, já que a sua regeneração perpassa por questões associadas às condições hidrológicas e ao restabelecimento das condições naturais do solo, anteriormente degradado (Silva et al., 2012). A degradação do solo é de difícil definição, já que o terreno só pode ser considerado degradado em relação a algum uso que lhe foi dado (Hochstrasser et al., 2014). Dessa forma, a degradação do solo é compreendida como resultante da interação complexa entre fatores naturais e fatores socioeconômicos ocorridos ao longo do tempo. Ainda assim, propriedades físicas e biológicas da paisagem, como relevo, solo e vegetação, podem ser mensuradas e monitoradas por meio de indicadores ambientais e técnicas de sensoriamento remoto, possibilitando a caracterização dos estágios de degradação (Silva, Barbosa e Santos, 2024).

No baixo curso do rio Pajeú, inserido no Núcleo de Desertificação de Cabrobó, observa-se a ocorrência de diversos terrenos com solos degradados por erosão (Lima et al., 2023; Galindo et al., 2024; Silva e Lima, 2024), associada a elevada suscetibilidade à desertificação (SEMAS, 2020). A dinâmica local das precipitações

associadas às características de litologia, clima, relevo, solos, vegetação e fatores antrópicos ocorridos no tempo e no espaço, possibilita a formação e expansão de terrenos degradados na paisagem regional. Essa paisagem resulta da sobreposição de múltiplos processos de degradação dos solos (EMBRAPA, 2001), típicos de ambientes semiáridos submetidos a usos históricos intensivos e pouco conservacionistas (Souza, Souza e Sousa, 2023).

Dessa forma, questões específicas relacionadas aos processos de degradação nessa região ainda não estão bem elucidadas, persistindo lacunas sobre quais relações existem entre o padrão espacial de cobertura do terreno (solo exposto vs. vegetação), a ocorrência de feições erosivas e os atributos edáficos, e como a vegetação (composição/estrutura) responde a esse gradiente de degradação. Para responder a essa questão, formularam-se as seguintes hipóteses: H1. Os setores com maior descontinuidade da cobertura vegetal exibem maior conectividade do escoamento superficial, refletida pela maior presença de feições erosivas laminares e lineares; H2. As áreas de transição entre vegetação e solo exposto apresentam maior frequência de espécies, típicas de ambientes degradados; H3. A frequência de bioindicadores de degradação é maior nas áreas com evidências de erosão laminar, indicando a remoção diferencial do solo.

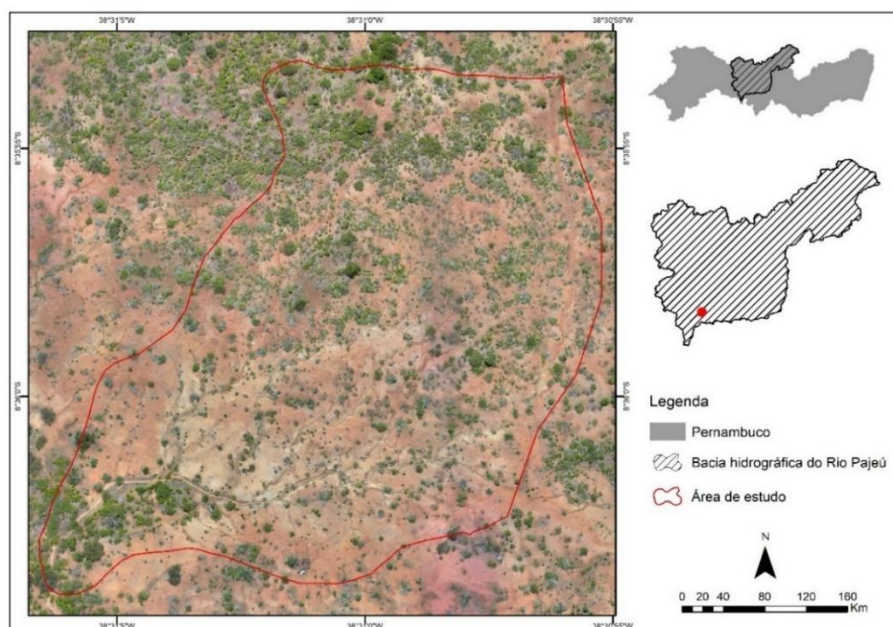
Com base nessas premissas, este estudo teve como objetivo analisar a degradação ambiental de terrenos erodidos e suscetíveis a desertificação em setores do baixo curso do rio Pajeú, no semiárido pernambucano, a partir de variáveis geomorfológicas, edáficas e de vegetação, visando compreender as respostas da paisagem às formas históricas de uso da terra.

2. Materiais e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um sistema erosivo experimental situado no baixo curso do rio Pajeú, (Figura 1), a cerca de 7 quilômetros da área urbana da cidade de Floresta (PE), que pode ser acessado pela rodovia PE-390, no sentido Leste.

Figura 1 – Mapa de localização do sistema erosivo no baixo curso do rio Pajeú (PE).



Fonte: Os autores (2026).

O sistema possui rochas do Paleoproterozóico como Metagabros com ou sem granada, metanortositos, metamonzodioritos, metaquartzodioritos, incluindo meta-hornblenditos com ou sem granada e minério de Fe-Ti (titanomagnetita) no terço superior, enquanto, nos terços médio e inferior, ocorrem Ortognaisses quartzodioríticos, dioríticos, tonalíticos granodioríticos, com biotitamagnetita e anfibólio localmente migmatizados (EMBRAPA, 2001).

Sobre essa litologia atua o clima semiárido, regionalmente com precipitação média anual de 400 mm, concentrada entre os meses de janeiro e abril. A chuva ocorre, muitas vezes, de forma descontínua, ocorrendo também fortes estiagens. A temperatura média anual é de 24 °C, com destaque para o mês de novembro, podendo alcançar até 39° C na máxima diária. Tal característica favorece a baixa umidade relativa do ar, a elevada evapotranspiração potencial e o baixo índice de água disponível no solo possibilitando a concentração de sais (EMBRAPA, 2001).

O terreno está inserido no contexto regional do Pediplano do Baixo Pajeú, que se caracteriza pelo predomínio de processos geomorfológicos de degradação e ocorrência de superfícies avermelhadas (EMBRAPA, 2001). Na área experimental ocorrem vertentes côncavas com baixas altitudes, entre 324 e 343 metros, e pequena variação de declividade: entre 2% e 12% no terço médio-superior, enquanto no terço inferior apresenta variações de 0% a 2%.

Na área experimental predomina o Luvissolo Crômico, que se caracteriza como raso com transição abrupta entre os horizontes A (arenoso, de cor vermelho-amarelo) e B (argiloso, textural, de coloração acinzentada). Em diversos trechos é recoberto por pavimento detrítico sobre camada superficial compactada, podendo ocorrer crostas.

A vegetação é do tipo Caatinga hiperxerófila, caracterizada por sua resistência a longos períodos de estiagem, através de seu mecanismo de adaptação sazonal, os arbustos perdem suas folhas no período hidrológico de estiagem (EMBRAPA, 2001). Apesar da adversidade inerente ao bioma, a região possui uma considerável riqueza de espécies, com indivíduos típicos das famílias Cactaceae, Euphorbiaceae e Fabaceae (Souza; Rodal, 2010; Maragon et al. 2013).

2.2 Aerolevantamento e processamento das imagens obtidas com ARP

Foram realizados sobrevoos com Aeronave Remotamente Pilotada – ARP (drone) em abril de 2025 (período úmido), com o objetivo de se obter dados do terreno, como topografia e cobertura do terreno. O modelo de aeronave utilizado foi o Air 2S da DJI, equipado com câmera de resolução 5,4 k e sensor CMOS (complementary metal oxide semiconductor) de 1”, com pixel de 2,4 µm.

Os planos de voo foram realizados no aplicativo Drone Harmony, com parâmetros de sobreposição do imageamento frontal e lateral de 75%, ângulo do gimbal de -90°, velocidade de voo de 5m/s e altitude de voo de 60 metros. A execução do plano de voo ocorreu em intervalo de tempo com o horário de maior luz do dia (sol a pino), para se reduzir as sombras nas imagens.

O processamento das imagens foi realizado com auxílio de computador com processador Intel(R) Core (TM) i5-13450HX; CPU 4.60 GHz e 16GB de RAM; GPU GeForce RTX 3050 de 6 GB. No software Agisoft Metashape, foi feito o alinhamento das imagens e elaborados dois produtos: [i] modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 47,7 cm/pixel; e os ortomosaicos com resolução de 1,77 cm/pixel.

2.3 Classificação das imagens

Os ortomosaicos foram exportados em formato raster de alta qualidade, do tipo GeoTIFF, já que essa extensão incorpora os metadados de georreferenciamento das imagens, como coordenadas, datum e projeção. No software ArcGIS Pro, realizou-se a classificação da imagem reconhecendo-se as diferentes coberturas do terreno.

O método escolhido foi a classificação não supervisionada K-means, onde o algoritmo agrupou os pixels em “clusters” com base em suas propriedades. Em seguida, cada cluster foi classificado de acordo com as

coberturas reconhecidas no sistema erosivo, a saber: solo exposto, vegetação herbácea e vegetação arbórea/arbustiva. Cada classe foi quantificada, de forma a se conhecer a ocupação de cada uma na área do sistema erosivo.

2.4 Variáveis geomorfológicas

Nas áreas com solo exposto, foram estabelecidas as variáveis indicadoras de degradação associadas a processos e formas erosivas, como, micro feições do relevo derivadas da erosão laminar e feições do relevo derivadas da erosão linear. Assim, realizou-se o inventário de formas erosivas e indicativas de erosão com o auxílio de ficha de cadastro de erosão, elaborada a partir de adaptações de Morgan (2005). O MDE foi utilizado para complementação dos dados morfométricos das formas lineares e para a classificação das feições segundo critérios dimensionais (SSSA, 2008).

Adicionalmente, foram utilizados dados de perda de solo por erosão laminar obtidas em experimento de campo na área de estudo, realizado por Nunes (2025). Para o experimento se utilizaram pinos de erosão de aço, instalados verticalmente e perpendicularmente ao terreno, em um setor do sistema erosivo com solo exposto. As mensurações foram realizadas a cada mês no período entre junho de 2024 e janeiro de 2026. As taxas de remoção de material foram obtidas pela perda acumulada de solo, pela estimativa de erosão e pela perda de solo por hectares.

2.5 Variáveis edáficas

As variáveis utilizadas nesta pesquisa foram, o grupo textural, o teor de matéria orgânica (MO) e carbono orgânico (CO). Foram tomadas amostras na camada superficial do solo (0 – 20 cm), de forma aleatória no terreno, correspondentes às três classes de cobertura. As amostras foram processadas no Laboratório de Análise de Formações Superficiais da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Rio Claro - SP.

O grupo textural foi definido após a obtenção da granulometria nas frações areia grossa, areia fina, areia total, silte e argila por difração a laser. Os teores de MO e CO foram determinados por oxidação com solução de sulfato ferroso amoniacal e dicromato de potássio, cujos valores de referência para CO foram analisados segundo Fontana et al. (2024).

2.6 Variáveis vegetacionais

Foi realizado o levantamento florístico com o propósito de se identificar as espécies e quantificar os indivíduos, de maneira a se analisar (ambientes degradados). Assim, foram estabelecidas parcelas de 10 m x 10 m, com equidistância de 20 m, ao longo de um transecto que perpassou as três classes de cobertura do terreno. Em cada parcela foi realizada a identificação, contagem e mensuração (altura e diâmetro do tronco) dos indivíduos de cada espécie (Rodal; Sampaio; Figueiredo, 2013), e tomadas amostras para a confecção das exsiccatas.

Plantas em pedestal foram analisadas enquanto indicador biogeomorfológico qualitativo de processos erosivos extremos, já que a sua altura, em algumas ocasiões, pode superestimar a perda de solo (Verheijen et al., 2024) devido ao acréscimo de partículas que respingam por causa do efeito ‘splash’. Ainda assim, foram selecionados indivíduos vivos, isolados em meio ao solo exposto, para medição da altura de exposição da primeira raiz secundária (a mais alta), até a altura atual do solo, com auxílio de paquímetro digital e fita métrica.

3. Resultados

3.1 Classes de cobertura do terreno

As classes de cobertura do terreno reconhecidas na área de estudo podem ser observadas na tabela 1. Os trechos com solo exposto predominaram, ocupando mais da metade da área de estudo.

Tabela 1 – Área ocupada pelas classes de cobertura da terra em abril de 2025.

Classe	Área (m ²)	Área (%)
Solo exposto	50.089,19	66,66
Vegetação herbácea	9.004,27	11,42
Vegetação arbórea/arbustiva	16.106,82	21,42

Fonte: Os autores (2025).

Ocorreram em todos os setores do sistema erosivo, porém, de maneira mais representativa na porção centro-sul. A vegetação arbórea/arbustiva se concentrou nas porções norte e sudoeste, correspondentes, respectivamente, às áreas de topo e leito de riacho. Pequenas concentrações de arbustos ocorreram em meio ao solo exposto, assim como arbustos isolados, entremeados por vegetação herbácea.

3.2 Perda de solo, processos e formas erosivas

Foram reconhecidas formas erosivas em diferentes escalas espaciais, classificadas entre: feições derivadas do splash; feições derivadas do escoamento superficial difuso - erosão laminar, como pavimento detrítico, pedestais, linhas de deposição de sedimentos e material biológico, e micro patamar erosivo; feições erosivas lineares, como microravinas, ravinas, voçorocas e interrill; e feições superficiais que potencializam a erosão linear, como as gretas de contração.

Sazonalmente, feições derivadas do splash e as linhas de deposição de sedimentos e material biológico foram evidentes no período chuvoso, enquanto as gretas de contração ocorreram nos dois períodos, porém, mais desenvolvidas no período úmido. Essas feições foram observadas de maneira generalizada nos trechos com solo exposto e foram associadas aos processos geomorfológicos derivados da interação entre a água precipitada sobre o terreno, o escoamento superficial difuso e o escoamento superficial concentrado.

Nas áreas de solo exposto à erosão laminar removeu quantidade significativa de partículas, refletida na taxa de erosão obtida através dos dados dos pinos. No período monitorado, a perda de solo acumulada foi de 0,34 cm; a estimativa de erosão foi de 0,46 kg/m²; e a perda de solo por hectares foi de 34,84 t/ha⁻¹.

3.3 Características edáficas do material de recobrimento superficial

Limitações nos teores de matéria orgânica e de carbono orgânico foram observadas nas amostras obtidas em solo exposto, comparativamente com aquelas obtidas em áreas vegetadas (Tabela 2).

Tabela 2 – Porcentagem de matéria orgânica e carbono orgânico das amostras de solo por classe de cobertura do terreno. SE: solo exposto; VH: vegetação herbácea; VAA: vegetação arbórea/arbustiva.

Amostra	Textura	MO (%)	CO (%)	Classificaçã o CO	Cobertura do terreno
S2P1	Franco argilo-arenosa	0,87	0,50	Baixo	SE
S2P2	Franco argilo-arenosa	0,90	0,52	Baixo	SE
S2P3	Franco arenosa	0,62	0,36	Baixo	SE
S2P4	Franco arenosa	18,4 7	10,7 1	Alto	VAA

S2P5	Franco arenosa	2,95	1,71	Médio	VAA
S2P6	Franco arenosa	0,90	0,52	Baixo	VH
S2P7	Franco arenosa	1,01	0,58	Baixo	VH

Fonte: Os autores (2025).

Os valores de MO e CO não apresentaram relações significativas com a textura do material de recobrimento superficial. Por outro lado, constatou-se que os maiores valores corresponderam a cobertura do terreno com vegetação arbórea/arbustiva, sendo o maior valor encontrado para o setor norte do sistema erosivo.

3.4 Levantamento florístico e aspectos das plantas em pedestal

No sistema erosivo, observou-se a distribuição heterogênea da vegetação, com concentração de indivíduos arbóreos e arbustivos nas porções norte e sudoeste, associadas, respectivamente, às áreas de topo e ao leito de drenagem intermitente, enquanto o setor central apresentou predomínio de solo exposto e ocorrência de indivíduos isolados (Tabela 3).

Tabela 3 – Espécies amostradas nas parcelas e classes de uso e cobertura associadas: SE – solo exposto; VH – vegetação herbácea; VAA – vegetação arbórea/arbustiva.

Espécie	Nome popular	Nº de indivíduos	Classe de cobertura do terreno
<i>Tacinga inamoena</i>	Quipá	62	VH
<i>Cenostigma pyramidale</i> Tul.	Catingueira	59	VAA/SE
<i>Aspidosperma pyriforme</i> Mart.	Pereiro	57	VAA/SE
<i>Cnidocolus quercifolius</i> Pohl.	Faveleira	57	VAA/SE
<i>Sida cordifolia</i> L.	Malva Branca	35	VAA
<i>Cereus jamacaru</i>	Mandacaru	1	VAA
<i>Aristida setifolia</i> H.B.K.	Capim-panasco	-	VH

Fonte: Os autores (2026).

A composição florística (Tabela 3) revelou o predomínio de espécies típicas da Caatinga hiperxerófila, porém, com baixa frequência de indivíduos, baixa diversidade de espécies e plantas pioneiras, além de plantas em pedestal encontradas nas áreas de solo exposto, formados predominantemente em *Cenostigma pyramidale* Tul e em *Aspidosperma pyriforme* Mart. O valor médio de altura da exposição das raízes em pedestal foi de 12cm.

4. Discussões

A organização espacial da cobertura do terreno no período analisado (Figura 2), se apresentou como o principal elemento explicativo da dinâmica de degradação no sistema erosivo, cenário semelhante ao que já foi encontrado em outras áreas do baixo Pajeú (Santos et al., 2009; Riegelhaupt et al., 2010; Souza et al., 2024). A predominância de solo exposto (>60% da área), distribuída por todos os setores indica uma paisagem com baixa proteção superficial dos solos, favorecendo maior conectividade do escoamento e, consequentemente, a intensificação dos processos erosivos, conforme descrito em abordagens conceituais clássicas e confirmado por estudos recentes em ambientes secos (Chen et al., 2013; Bendito; Chaves; Scariot, 2023; Farias et al., 2025). Nesse contexto, a vegetação deixa de atuar como reguladora do balanço hídrico superficial ao reduzir a energia de impacto das gotas de chuva (splash) e favorecer a infiltração, e o mosaico solo exposto–manchas vegetadas passa a atuar como um mecanismo que direciona e concentra fluxo hidrológico onde a superfície desprotegida é mais contínua (Al Balasmeh; Karmaker; Babbar, 2023).

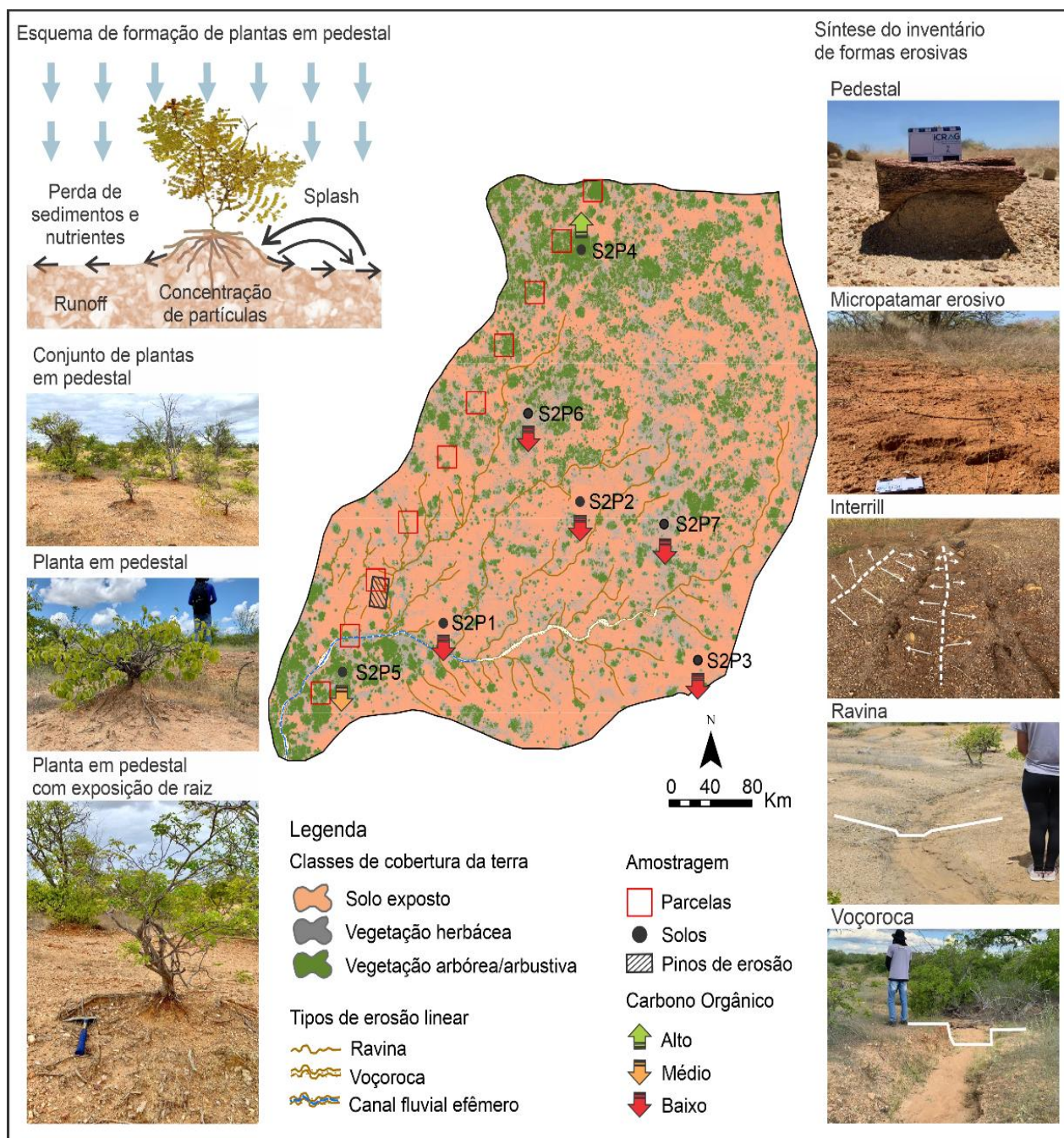
Os aspectos geomorfológicos reforçam essa relação ao demonstrar a coexistência de feições associadas ao splash e ao escoamento superficial difuso (pedestais e micro patamar erosivo, p. ex.), em conjunto com feições lineares como microravinas, ravinas, voçorocas e interrill (Figura 2), e as gretas de contração, que são potencializadoras da erosão linear, já que podem concentrar fluxos. Essa combinação sugere que o sistema não apenas perde solo por escoamento superficial difuso, mas apresenta sinais de organização progressiva do escoamento, em que a degradação superficial do terreno favorece a transição para formas erosivas lineares, mais eficientes para a remoção e transporte de sedimentos (Wu e Chen, 2020). As chuvas torrenciais mobilizam material e reorganizam a superfície, enquanto fases secas mantêm condições de fragilidade e reconfiguração do material superficial, conforme observado por Lima; Nunes; Lupinacci (2024) e Lima et al. (2025) em sistema erosivo similar localizado nas proximidades da área em estudo, o que corrobora com essa interpretação.

Por sua vez, a magnitude da perda de solo mensurada com os pinos de erosão validou a compreensão de um processo que é ativo e persistente no contexto analisado, cuja perda acumulada foi de 0,34 cm, com estimativa de erosão de 0,46 kg/m² e perda de 34,84 t/ha⁻¹. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2017), a perda de solo para perfis rasos apresenta limite de tolerância de 16,5 t/ha-1, o que faz com que o valor obtido na área de estudo seja considerado alto. Esses valores indicam um balanço entre erosão e recuperação negativo do terreno, com potencial de rebaixamento do horizonte superficial e redução de sua funcionalidade. Nesse contexto, a erosão laminar se destaca não apenas pela remoção direta de material, mas por criar condições que favorecem a conectividade do escoamento (Rodrigues; Souza, 2025) e a persistência de feições erosivas que mantêm o sistema em estado degradado.

As evidências edáficas convergem com esse cenário ao indicar os contrastes entre as variáveis segundo as classes de cobertura (Figura 2). As áreas de solo exposto apresentaram baixos teores de matéria orgânica e carbono orgânico (CO variando entre 0,36 e 0,52%), enquanto nas áreas com vegetação arbórea/arbustiva ocorreram valores mais elevados (incluindo a amostra com MO 18,47% e CO 10,71%, além de outra com MO 2,95% e CO 1,71%). Ainda que esses valores não tenham apresentado relação significativa com a textura do solo, o padrão por cobertura sugere que a remoção contínua de material superficial nos trechos desprotegidos está associada ao empobrecimento edáfico, reduzindo atributos fundamentais para agregação, retenção de água e disponibilidade de nutrientes (Bieluczyk et al., 2025).

Assim, os resultados apontam para a existência de um mecanismo de retroalimentação, onde a erosão reduz MO/CO e, ao empobrecer o solo, dificulta o restabelecimento da vegetação, mantendo o terreno exposto e vulnerável. Galindo et al. (2008), Martins et al. (2010) e Ferraz et al. (2014), em outros contextos regionais semelhantes, verificaram que a maior ocorrência de MO nos solos estudados estavam relacionados às áreas com maior aporte de vegetação em setores preservados, ao passo que as áreas degradadas apresentaram baixos valores e forte atuação do escoamento superficial e erosão laminar na remoção desses indicadores.

Figura 2 – Síntese dos aspectos geomorfológicos, edáficos e vegetacionais associados às classes de cobertura da terra do sistema erosivo em 2025.



Fonte: Os autores (2026).

A distribuição espacial heterogênea da vegetação indica baixa funcionalidade ecológica do sistema. A composição florística, marcada pela dominância de espécies hiperxerófilas, como *T. inamoena* (62 indivíduos), *C. pyramidale* (59), *A. pyrifolium* (57) e *C. quercifolius* (57), sugere seleção de espécies mais tolerantes nas condições impostas pelo empobrecimento edáfico e pela instabilidade superficial, sobretudo em setores de

transição e áreas degradadas. A baixa densidade de espécies lenhosas pode ser uma combinação de fatores intrínsecos ao ecossistema, como tipo de solo e índice pluviométrico, e fatores extrínsecos decorrente de práticas agropecuárias, manejo inadequadas do solo e outras ações antrópicas, refletindo-se na reduzida diversidade e frequência de plantas arbóreas (Galindo et al., 2008; Santos et al. 2009; Costa et al. 2009; Souza; Artigas; Lima, 2015; Vital et al. 2021; Neto, 2022).

A presença de espécies xerófilas, como as identificadas neste estudo, está fortemente associada a ambientes degradados ou em processo de desertificação, com destaque para a catingueira (*Cenostigma pyramidale*) e o pereiro (*Aspidosperma pyriforme*) (Souza; Artigas; Lima, 2015; Neto, 2022). Essas espécies, notórias pela sua elevada tolerância fisiológica à escassez hídrica e à baixa fertilidade edáfica, frequentemente assumem dominância em áreas onde a descontinuidade da cobertura vegetal e a erosão intensa reduziram a resiliência do ecossistema. Sua persistência em cenários de solo exposto e instabilidade superficial reflete a exclusão de espécies mais exigentes, tornando a composição florística local um bioindicador direto do histórico de perturbações antrópicas e da vulnerabilidade ao avanço da desertificação (Bieluczyk et al., 2025).

A ocorrência exclusiva de plantas em pedestal em solo exposto reforça a leitura da vegetação como bioindicadora de remoção diferencial e de intensidade erosiva, qualificando a interpretação do sistema como ambiente de degradação ativa e constante. Esse padrão sugere estreita relação entre a formação dos pedestais e a redução da cobertura vegetal, reduzindo a proteção física do solo frente ao impacto direto das chuvas e à ação do escoamento da água. Nessas condições, a remoção seletiva das partículas do solo intensifica o rebaixamento da superfície ao redor dos indivíduos, preservando pequenas elevações sustentadas pelo sistema radicular das plantas (Santos et al. 2022). As plantas em pedestal, ou raízes expostas em pedestal, constitui indicadores de ambientes degradados (Teshahunegn et al., 2022; Tabarelli et al. 2025), como visto por Santos et al. (2022) para uma área da Bahia, onde foi possível compreender o cenário histórico de degradação do ambiente.

No contexto da Caatinga, tal feição assume relevância ecológica e geomorfológica por indicar o avanço de processos de desertificação, nos quais a taxa de perda de solo supera sua capacidade natural de regeneração. Assim, a presença dessas estruturas, associada ao solo desnudo, evidencia não apenas a instabilidade superficial, mas também o comprometimento das funções ecossistêmicas relacionadas à retenção hídrica, ciclagem de nutrientes e manutenção da capacidade produtiva do ambiente (Santos et al., 2022). Dessa forma, os pedestais vegetais consolidam-se como marcadores físicos e biológicos do histórico de degradação edáfica, dialogando diretamente com a composição florística adaptada a condições extremas e com a dinâmica erosiva observada na área.

Em conjunto, os resultados indicam que a descontinuidade da cobertura vegetal aumenta a conectividade do escoamento e intensifica a erosão (Bendito et al., 2023). A erosão, por sua vez, empobrece o solo (MO/CO), reduzindo sua capacidade de sustentar a regeneração vegetal; e a vegetação remanescente passa a expressar uma composição dominada por espécies tolerantes e sinais biogeomorfológicos de rebaixamento do nível do solo. Esse encadeamento configura um sistema com baixa resiliência, no qual os mecanismos naturais de recuperação tendem a ser limitados, reforçando a vulnerabilidade a processos de desertificação no semiárido pernambucano.

4 Conclusão

O sistema erosivo analisado no baixo curso do rio Pajeú expressa um estágio avançado de degradação ambiental, marcado pela perda de funcionalidade ecológica e baixa resiliência da paisagem, em um contexto regional de elevada suscetibilidade à desertificação no semiárido pernambucano.

Os resultados sustentam que a descontinuidade da cobertura vegetal atua como eixo estruturante do processo de degradação ao intensificar a conectividade do escoamento e a dinâmica erosiva, ao mesmo tempo em que favorece o empobrecimento edáfico e restringe a regeneração da vegetação, mantendo o sistema em retroalimentação. Nesse cenário, a vegetação remanescente e seus bioindicadores reforçam o diagnóstico de

degradação ativa e persistente, indicando que medidas de manejo e restauração devem priorizar a recomposição dos terrenos e da vegetação, além da redução da conectividade do escoamento superficial da água para romper o ciclo de degradação e combater a desertificação.

5 Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE, pela concessão de auxílio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa (Processo nº APQ-0899-7.06/21); e pela concessão de bolsa ao primeiro autor (Processo BIC 0503-07.06/25). À Universidade de Pernambuco pela concessão de bolsa institucional, modalidade PFA (Programa de Fortalecimento Acadêmico), para a segunda autora.

6 Referências

- Al Balasmeh, O., Karmaker, T., & Babbar, R. (2023). Experimental investigation and modelling of rainfall-induced erosion of semi-arid region soil under various vegetative land covers. *Journal of Hydroinformatics*, 25(3), 1029-1053.
- Andrade, T.S., & Souza, J.A. (2016). **Degradação e recuperação de áreas degradadas em regiões semiáridas**. In: Araujo, S.M.S. & Dantas Neto (Orgs). *Recuperação de áreas degradadas: conceitos, temas e casos*. Editora CRV.
- Bendito, B. P. C., Chaves, H. M. L., & Scariot, A. (2023). Erosion and sedimentation processes in a semi-arid basin of the Brazilian Savanna under different land use, climate change, and conservation scenarios. *Water*, 15(3), 563.
- Bertoni, J. & Lombardi Neto, F. (2017). **Conservação do solo**. Ícone Editora.
- Bieluczyk, W., et al. (2025). From overgrazed land to forests: assessing soil health in the Caatinga biome. *Journal of Environmental Management*, 374, 124022.
- Chen, L., Sela, S., Svoray, T., & Assouline, S. (2013). The role of soil-surface sealing, microtopography, and vegetation patches in rainfall-runoff processes in semiarid areas. *Water Resources Research*, 49(9), 5585-5599.
- Costa, T. C. C. et al. (2009). Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 961-974.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2001). **Diagnóstico Ambiental do Município de Floresta, Pernambuco**. Embrapa Solos.
- Farias, T. R. L., Chaves, M. T. R., Almeida, C. L., Medeiros, P. H. A., Araújo, J. C., & Navarro Hevia, J. (2025). Erosion on marginal slopes of unpaved roads in semi-arid Brazil, and the role of Caatinga vegetation in sediment retention and disconnectivity. *Journal of Arid Land*, 17, 500–514.
- Ferraz, J. S. F., Albuquerque, U. P. D., & Meunier, I. M. J. (2006). Valor de uso e estrutura da vegetação lenhosa às margens do riacho do Navio, Floresta, PE, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 20(1), 125-134.
- Ferreira, J. R. (2011). **Práticas de sociabilidade de proprietários fundiários de Floresta e de Tacaratú: sertão de Pernambuco (1840-1880)**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.
- Fontana, A., Vivian, A. M., Arco, M. A. de L., Menezes, A. R., Santos, B. V., & Clemente, E. de P. (2024). **Níveis de referência do carbono orgânico no solo sob vegetação natural dos biomas brasileiros**. Embrapa Gado de Corte.

- Galindo, I. C. de L., Ribeiro, M. R., Santos, M. de F. de A. V., Lima, J. F. W. F., & Ferreira, R. F. de A. e L. (2008). Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(3), 1283-1296.
- Galindo, I. J. S., Godoi, M. E., Silva, E. G. S. M., & Lima, K. C. (2024). Degradação ambiental por feições erosivas na bacia hidrográfica do riacho Carro Quebrado no município de Floresta - PE. **International Journal Semiarid**, 7(1), 244-249.
- Hochstrasser, T., et al. (2014). **The Study of Land Degradation in Drylands: State of the Art**. In: Mueller, E., Wainwright, J., Parsons, A., Turnbull, L. (eds) *Patterns of Land Degradation in Drylands*. Springer, Dordrecht.
- Küster, A., & Martí, J. (2006). **Ambientes semiáridos e processos de ocupação no Brasil**. Contexto.
- Lima, E. R., et al. (2023). Processos erosivos e degradação dos solos no Núcleo de Desertificação de Cabrobó (PE). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 16(3), 1123–1141.
- Lima, K. C., Nunes, I. D., Lupinacci, C. M., Valézio, E. V., & Souza, C. M. P. (2025). Comportamento erosivo em inter-rill após evento pluviométrico torrencial no semiárido pernambucano. **Anais do XV Simpósio Nacional de Geomorfologia**, Natal, RN, Brasil.
- Lima, K.C., Lupinacci, M., Gomes, D. D. M., Souza, S. O., & Alexandre, F. S. (2023). Erosão em áreas suscetíveis à desertificação no Semiárido: Possibilidades de análise por meio da cartografia geomorfológica baseada em imagens de altíssima resolução. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 24(2), 301–322.
- Lima, K.C., Nunes, I.D., Lupinacci, C.M. Dinâmica erosiva em ambiente semiárido: uma abordagem empírica por meio de pinos de erosão no município de Floresta (PE). **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada & IV Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente**, Joao Pessoa, PB, Brasil.
- Macedo, R. S., et al. (2023). Efeitos da degradação nos atributos de solos sob Caatinga no Semiárido brasileiro. **Revista Árvore**, 47, e4700002.
- Martins, C. M., Galindo, I. C. de L., Souza, E. R. de, & Poroca, H. A. (2010). Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34(6), 1883-1890.
- Montenegro, S. M. G. L. (2023). Desertificação no Brasil: A exploração não planejada dos recursos naturais e as mudanças climáticas acarretam danos irreversíveis ao meio ambiente. **Ciência e Cultura**, 75(4), 40–45.
- Morgan, R. P. C. (2005). **Soil erosion and conservation**. Blackwell Publishing.
- Neto, M. C. P. (2024). Fitogeografia da Caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (Brasil). **Revista do Departamento de Geografia**, 44, e205638-e205638.
- Nunes, I. D. (2025). **Morfodinâmica em sistema erosivo no semiárido de Pernambuco**: uma avaliação a partir de experimentos de campo. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Pernambuco, Garanhuns, PE.
- Rodal, M.J.N., Sampaio, E.V.S.B., & Figueiredo, M.A. (2013). **Manual sobre métodos de estudo florístico e fitossociológico**. Sociedade Botânica do Brasil.
- Rodrigues, J.M.& Souza, J.O.P. (2025). Modelagem de conectividade estrutural e funcional no alto curso do rio Piranhas, região semiárida brasileira. **Caderno de Geografia**, 35, 81, 571-571.
- Sánchez, L. E. (2020). **Avaliação de impacto ambiental: Conceitos e métodos** (3a ed.). Oficina de Textos.

- Santos de Jesus, D., Vellame, L.M., da Silva, A.J.P., de Araújo, J.C. (2022). Soil pedestal dating in the degraded Salitre River basin in the northeast of Bahia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 118, 103978.
- Santos, M. F. V. et al. (2009). Diversidade e densidade de espécies vegetais da caatinga com diferentes graus de degradação no município de Floresta, Pernambuco, Brasil. **Rodriguésia**, 60(2), 389-402.
- Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco. (2020). **Zoneamento das áreas suscetíveis à desertificação no Estado de Pernambuco**. SEMAS.
- Silva, I. A. & Lima, K. C. (2024). Aspectos morfodinâmicos de processos erosivos por meio de SIG no município de Itacuruba, semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, 5, 175-188.
- Silva, L. R. M., Barbosa, H. A., & Santos, A. M. (2024). Variabilidade e tendência espaço-temporal da Caatinga relacionadas com a degradação ambiental no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 17(2), 804–823.
- Soil Science Society of America. (2008). **Glossary of Soil Science Terms**. John Wiley & Sons.
- Souza, A. C. N., Souza, S. D. G., & Sousa, M. L. M. (2023). A desertificação nas pesquisas de degradação ambiental no semiárido brasileiro: Uma revisão sistemática integrativa da literatura. **Boletim de Geografia**, 41, 1–22.
- Souza, B. I., Artigas, R. C., & Lima, E. R. V. (2015). Caatinga e desertificação. **Mercator**, 14, 134-150.
- Souza, D. D. R. de, Araújo Filho, J. C. de, Araújo, M. do S. B. de, & Silva, D. F. da. (2024). Análise espaço-temporal do uso da terra em municípios do Núcleo de Desertificação de Cabrobó, Pernambuco. **Revista Contexto Geográfico**, 9(18), 133-142.
- Souza, J. A. N., & Rodal, M. J. N. (2010). Levantamento florístico em trecho de vegetação ripária de caatinga no Rio Pajeú, Floresta / Pernambuco - Brasil. **Revista Caatinga**, 23(4), 54-62.
- Tabarelli, M., Leal, I. R., Lopes, A. V., Canassa, N., & Araujo, H. F. P. (2025). Changing the paradigm for the development of the Caatinga dry forest region to rescue threatened biodiversity and improve sustainability. **Conservation Biology**, 39, e70030.
- Tesfahunegn, G. B., Ayuk, E.T., Adiku, S.G.K. (2021). Farmers' perception on soil erosion in Ghana: Implication for developing sustainable soil management strategy. **Plos One** 16(3), e0242444.
- Verheijen, F. G. A., Martins, M. A. S., Prats, S. A., & Keizer, J. J. (2024). A new approach to pedestal differentiation for soil loss estimation: A case study from a burnt area in north-central Portugal. **Journal of Forestry Research**, 35(42), 1-10.
- Vital, M. J. L. et al. (2021). Levantamento florístico na Caatinga: comparação entre uma área preservada e uma área degradada no Sertão Pernambucano. **Research, Society and Development**, 10(12), e76101220153-e76101220153.
- Wu, S., & Chen, L. (2020). Modeling soil erosion with evolving rills on hillslopes. **Water Resources Research**, 56, e2020WR027768.