

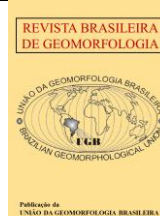


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, nº ESPECIAL (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2359>



Artigo de Pesquisa

Processos de voçorocamento no Planalto da Borborema, semiárido da Paraíba

Gulling processes in the Borborema Plateau, Paraíba semiarid region

Rafael Albuquerque Xavier¹, Inocencio de Oliveira Borges Neto²; José João Lelis Leal de Souza³, Philippe Valente Cardoso⁴; Jonas Otaviano Praça de Souza⁵, Bartolomeu Israel de Souza⁶

- ¹ Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Geografia, Campus I, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
rafaelxavier@servidor.uepb.edu.br
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1737-7547>
- ² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geografia, Curitiba, Paraná, Brasil. iobngpb@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-3879>
- ³ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, Viçosa-MG, Brasil. jllelis@ufv.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4670-6626>
- ⁴ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Formação de Professores, Departamento de Geografia, São Gonçalo, Rio de Janeiro, Brasil. phillipevalente@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2850-6033>
- ⁵ Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
jonas.souza@academico.ufpb.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1405-0944>
- ⁶ Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
bartolomeuisrael@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2173-8314>

Recebido: 23/02/2023; Aceito: 30/05/2023; Publicado: 03/07/2023

Resumo: Estudos sobre processos de voçorocamento são ainda relativamente escassos e, em maioria de caráter estritamente morfológico. De modo geral, consideram-se as erosões por fluxos hídricos subsuperficiais (seepage e piping) e os consequentes movimentos de massa das bordas como os principais processos no controle da evolução do voçorocamento. Na região semiárida brasileira, sobre rochas cristalinas, os processos de voçorocamento não parecem seguir o modelo clássico de regiões úmidas, uma vez que a infiltração da água subterrânea é restrita a baixas profundidades por camadas de baixa permeabilidade próximas da superfície. Nesse sentido, objetivou-se estabelecer princípios que expliquem a gênese e evolução do processo de voçorocamento na porção semiárida do Planalto da Borborema, no Estado da Paraíba. Para tanto, foram realizados levantamentos aerofotogramétricos com drone nos anos de 2020 e 2022. Foram descritos dois perfis de solos e realizado análises físicas, químicas e micromorfológicas. As voçorocas foram tipificadas de acordo com Thwaites et al. (2022) e, verificada a distribuição das chuvas dentro do período amostral. Os resultados mostraram processos de voçorocamento ativos, com significativos crescimentos das formas em relação as poucas chuvas ocorridas. O decréscimo de porosidade total nos horizontes B texturais em relação ao horizonte superficial, nódulos e cores acinzentadas na parede de agregados sugerem baixa conduvidade hidráulica vertical e indicam movimentos laterais dentro do perfil do solo. Fatores hidrogeomorfológicos locais, associados as características dos solos, são os responsáveis pelo processo de voçorocamento.

Palavras-chave: erosão de vazamento; erosão em túneis; depósito aluvial; erosão no semiárido.

Abstract: Studies on gully processes are relatively scarce, and the most, are strictly morphological. In general, erosions by subsurface water flows (seepage and piping) and the consequent mass movements of the edges are considered the main processes in controlling the evolution of gullies. In the Brazilian semiarid region, over crystalline rocks, the gully processes do not seem to follow the classic model of humid regions, since groundwater infiltration is restricted to low depths by layers of low permeability close to the surface. In this sense, the objective was to establish principles that explain the genesis and evolution of the gully process in the semi-arid portion of the Borborema Plateau, in the Paraíba State. To this end, aerial photogrammetric surveys were carried out with a drone in the years 2020 and 2022. Two soil profiles were described, and physical, chemical and micromorphological analyzes were carried out. The gullies were typified according to Thwaites et al. (2022) and verified the distribution of rainfall within the sample period. The results showed active gully processes, with significant growth of forms in relation to the few rainfalls that occurred. The decrease in total porosity in the textural B-horizons in relation to the surface horizon, nodules, and grayish colors in the aggregate wall suggest low vertical hydraulic conductivity and lateral movements within the soil profile. Local hydrogeomorphological factors, associated with soil characteristics, are responsible for the gully process.

Keywords: seepage erosion; piping erosion; alluvial deposit; erosion in the semiarid.

1. Introdução

O semiárido brasileiro apresenta grande diversidade pedológica. Esta heterogeneidade é produzida sobretudo pela significativa variação espacial pluviométrica observada (300 - 900 mm/ano) associada a mudanças no embasamento geológico (CPRM, 2021; KAYANO; ANDREOLI, 2009). Os processos de intemperismo e desenvolvimento de regolitos são distintos espacialmente (XAVIER, 2021). Via de regra, áreas sedimentares com volumes pluviométricos superiores a 800 mm/ano desenvolvem processos de intemperismo e formação de solos profundos e distróficos, semelhantes aos de áreas tropicais úmidas. A Chapada do Araripe e a Serra da Ibiapaba são representativas desse contexto, onde são observados solos profundos como os Latossolos Amarelos nas escarpas úmidas (MEIRA; SILVA, 2021; SOUZA et al., 2020). Por outro lado, o semiárido mais seco, com totais anuais de pluviosidade inferiores a 500 mm, e embasamento rochoso cristalino composto por rochas metamórficas e ígneas, apresenta solos rasos e eutróficos, como os Neossolos Litólico e Regolítico e Luvisso Crômico, conforme descritos por Borges Neto (2021), Borges Neto et al. (2023) e Xavier (2021), no semiárido paraibano.

A degradação quantitativa e qualitativa dos solos pela erosão hídrica é um dos mais sérios problemas ambientais das regiões semiáridas (AVNI, 2005; BORGES NETO, 2021; BORGES NETO et al., 2023; BORRELLI et al., 2017; SANTOS et al., 2007), pois trata-se de um ambiente ecologicamente instável e de forte atuação antrópica (SOUZA; SILANS; SANTOS, 2004; SOUZA; SOUZA, 2016; SOUZA; SUERTEGARAY; LIMA, 2009). Os solos do semiárido brasileiro apresentam alta susceptibilidade a erosão hídrica, devido a ocorrência de chuvas torrenciais, presença de vegetação decídua, grande percentual de solo exposto e emprego de técnicas agrícolas não conservacionistas (ALBUQUERQUE et al., 2001; BORGES NETO, 2021; BORGES NETO et al., 2023; LOPES; MONTENEGRO; LIMA, 2019; SANTOS et al., 2018; XAVIER et al., 2016). Contudo, Xavier (2021), destaca que, a depender principalmente do tipo de substrato geológico, os processos erosivos serão distintos.

As regiões semiáridas sobre rochas cristalinas apresentam limitações quanto a disponibilidade hídrica subterrânea (GHEYI et al., 2012; GUIHÉNEUF et al., 2014; WADI et al., 2022). Nessas áreas, o sistema geomorfológico funciona predominantemente por fluxos hídricos superficiais, como os fluxos do tipo hortoniano nas encostas e regimes fluviais efêmeros e intermitentes (GOUDIE, 2013). Nesse tipo de ambiente há desconectividade hidrológica subsuperficial, não sendo comum a continuidade lateral da saturação dos solos (BRACKEN; CROKE, 2007; SOUZA; HOOKE, 2021). Entretanto, condições locais específicas conectam os fluxos hidrológicos subsuperficiais e a formação de voçorocamento (XAVIER, 2021).

Ainda são poucos os trabalhos que estudam o processo de voçorocamento na perspectiva genética associada aos fluxos hídricos subsuperficiais, bem como sobre a conectividade hidrológica subsuperficial em encostas, conforme preconizado por Rubey (1928), Terzagui (1943) e Pichler (1953), e o seu papel na evolução das encostas (AUGUSTIN; ARANHA, 2006; COELHO NETTO et al., 1988; COELHO NETTO, 2003; MACHIORO et al., 2016). A maioria dos estudos sobre voçorocamento ainda focam apenas nos aspectos morfológicos em relação ao escoamento superficial (ANDERSON; ROWNTREE; LE ROUX, 2021; KOCI et al., 2020; VALENTIN; POESEN; LI, 2005).

Para o semiárido brasileiro, os poucos trabalhos sobre voçorocamento, são voltados para análise morfológica (ALEXANDRE; CANDEIAS; GOMES, 2021; ALENCAR, 2018; BISPO et al., 2018), e processos genéticos com ênfase no escoamento superficial (PINTO; ARAÚJO, 2020 a e b; SILVA; GOMES; GOMES, 2022). Diante desse quadro, o presente estudo visa analisar o processo de voçorocamento no semiárido paraibano sobre o Planalto da Borborema e discutir em que condições esse processo pode ocorrer e quais são seus mecanismos dominantes.

1.1. Considerações sobre voçorocas e voçorocamento

Primeiramente é preciso, didaticamente, separarmos a forma e o processo. Voçorocas são formas de canais incisos, com bordas bem definidas e paredes laterais íngremes. Essas formas variam de centímetros a dezenas de metros de profundidade, e podem ou não estar conectadas a rede fluvial. Entretanto, Castillo e Gómez (2016) e Thwaites et al. (2022), destacam que apesar de mais de um século de estudos sobre voçorocas, as diversas definições e nomenclaturas utilizadas têm causado confusão na compreensão sobre as voçorocas e seus processos gerados em todo o mundo.

Uma das primeiras necessidades é a de diferenciar a voçoroca de outras formas erosivas na superfície, como as ravinas. Predominam estudos de caracterização dimensional envolvendo largura e profundidade como limites entre as formas. Tradicionalmente as voçorocas são definidas como formas de tamanho mínimo de 30 cm de largura e profundidade (POESEN, 1993). Como a erosão dos solos sempre teve muito associada as terras agricultáveis, logo estabeleceu-se a lógica de que voçorocas seriam mais profundas que a camada arável e de difícil obliteração (TORRI; BORSELLI, 2000). Dessa premissa, evoluiu o conceito de voçorocas efêmeras e permanentes. A voçoroca efêmera seria uma feição erosiva que pode ser obliterada por máquinas agrícolas, onde nesses casos deveria ser chamada de ravinas (GOUDIE, 1985). A voçoroca permanente não poderia ser mais obliterada pelo arado e/ou outras máquinas. Assim, baseado no alcance das máquinas na profundidade do solo, estabeleceu-se o limite mínimo de 50 cm para ser uma voçoroca. Por mais simplista que pareça, esse é o principal critério utilizado para distinguir ravinas de voçorocas (GUERRA, 1998; 1999; OLIVEIRA, 1999; NSSH, 2008; NYSSSEN, 2007; THWAITES; BROOKS, 2021).

Para além da dimensão da forma, outros trabalhos incluíram a necessidade de investigação dos processos geomorfológicos dominantes na gênese e evolução da voçoroca. Nesse momento, existe uma literatura internacional consolidada que consorcia a profundidade mínima estabelecida com a ocorrência de vários mecanismos erosivos subsuperficiais, dentre eles os túneis erosivos (*piping*) (FAULKNER et al., 2004; 2008; LEE; CHARMAN, 2005; SALLEH; MOUSAZADEH, 2011; THWAITES; BROOKS, 2021; THWAITES et al., 2022). No Brasil, devido a predominância de espessos regolitos na maior parte do território, e a existência de voçorocas de dezenas de metros de profundidade, alguns trabalhos sugerem profundidades mínimas de 1,5 metros (VIEIRA, 2008; FARIAS et al., 2010). Diante da dificuldade de se estabelecer uma profundidade que separe as ravinas das voçorocas, diversos trabalhos utilizaram os processos genético-evolutivos como critério principal para o estudo das voçorocas e, neste caso, do voçorocamento (AUGUSTIN; ARANHA, 2006; AUGUSTIN; ARANHA; COE, 2012; BACCARO, 2015; COELHO NETTO et al., 1988; COELHO NETTO, 1998; 1999; 2003; LEAL; COELHO NETTO; AVELAR, 2015; MACHIORO et al., 2016; ROCHA-LEÃO, 2005; SALOMÃO, 2015; XAVIER, 2021).

O presente trabalho considera os processos geomorfológicos dominantes como forma de caracterizar o voçorocamento. Enquanto as ravinas são formas incisivas lineares, geradas e controladas exclusivamente por fluxos hídricos superficiais, as voçorocas funcionam por vários mecanismos associados. O processo de voçorocamento tem início nas faces de exfiltração dos fluxos hídricos subsuperficiais (DUNNE, 1980; 1990), gerando erosão de vazamento (*seepage erosion*) e em túneis (*piping erosion*). A erosão de vazamento ocorre quando a pressão exercida pelo fluxo exfiltrante atinge uma descarga crítica, deslocando partículas do meio poroso (COELHO NETTO, 1998; 2003). A erosão em túneis ocorre devido a concentração de fluxos hídricos subsuperficiais em rotas preferenciais que, devido ao gradiente hidráulico, adquire capacidade de carrear partículas do solo (BERNATEK-JAKIEL; POESEN, 2018). A recorrência desses fluxos gera a formação e o crescimento do túnel em subsuperfície, e a voçoroca surgiria a partir do colapso do teto do túnel (AUGUSTIN, ARANHA, 2006). A erosão por vazamento e em túneis podem atuar concomitantemente (COELHO NETTO, 1998; WILSON et al., 2017). O transporte horizontal de partículas do solo em subsuperfície desestabiliza horizontes/camadas subjacentes e, em condições críticas, pode ocorrer o colapso dos materiais superiores, e a abertura da feição erosiva em superfície (WILSON et al., 2017). Nesse momento é formada a voçoroca, e sua evolução seguirá as rotas de fluxos hídricos subsuperficiais, de forma regressiva no relevo. A voçoroca aumenta em extensão por regressão de suas paredes através de sucessivos

colapsos (AUGUSTIN; ARANHA, 2006; THWAITES et al., 2022), e o escoamento superficial contribuirá para gerar incisões secundárias e na remoção dos sedimentos produzidos no interior da voçoroca (CHAPLOT, 2013).

2. Área de Estudo

O processo de voçorocamento estudado está localizado na bacia do Riacho da Cachoeirinha (4 km² de área), tributário do Riacho Salgadinho, afluente do Rio Paraíba, em seu alto curso. O local de estudo fica no município de São João do Cariri, próximo ao limite com os municípios de São Domingos do Cariri e Caraúbas (Figura 1).

De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESAs), a pluviosidade média anual em São João do Cariri é 381,4 mm e em Caraúbas é de 365,6 mm. A geologia é basicamente composta por gnaisses e migmatitos (CPRM, 2005 a, b e c). Luvissole Crômico, Neossolo Litólico e Neossolo Regolítico dominam na área (BRASIL, 1972; CPRM, 2005 a, b e c). A geomorfologia regional consiste no Planalto da Borborema, no setor da Depressão Interplanáltica Paraibana (CORRÊA et al., 2010). O relevo local é marcado por extensas superfícies aplainadas entrecortadas por colinas amplas suaves e de baixa amplitude altimétrica.

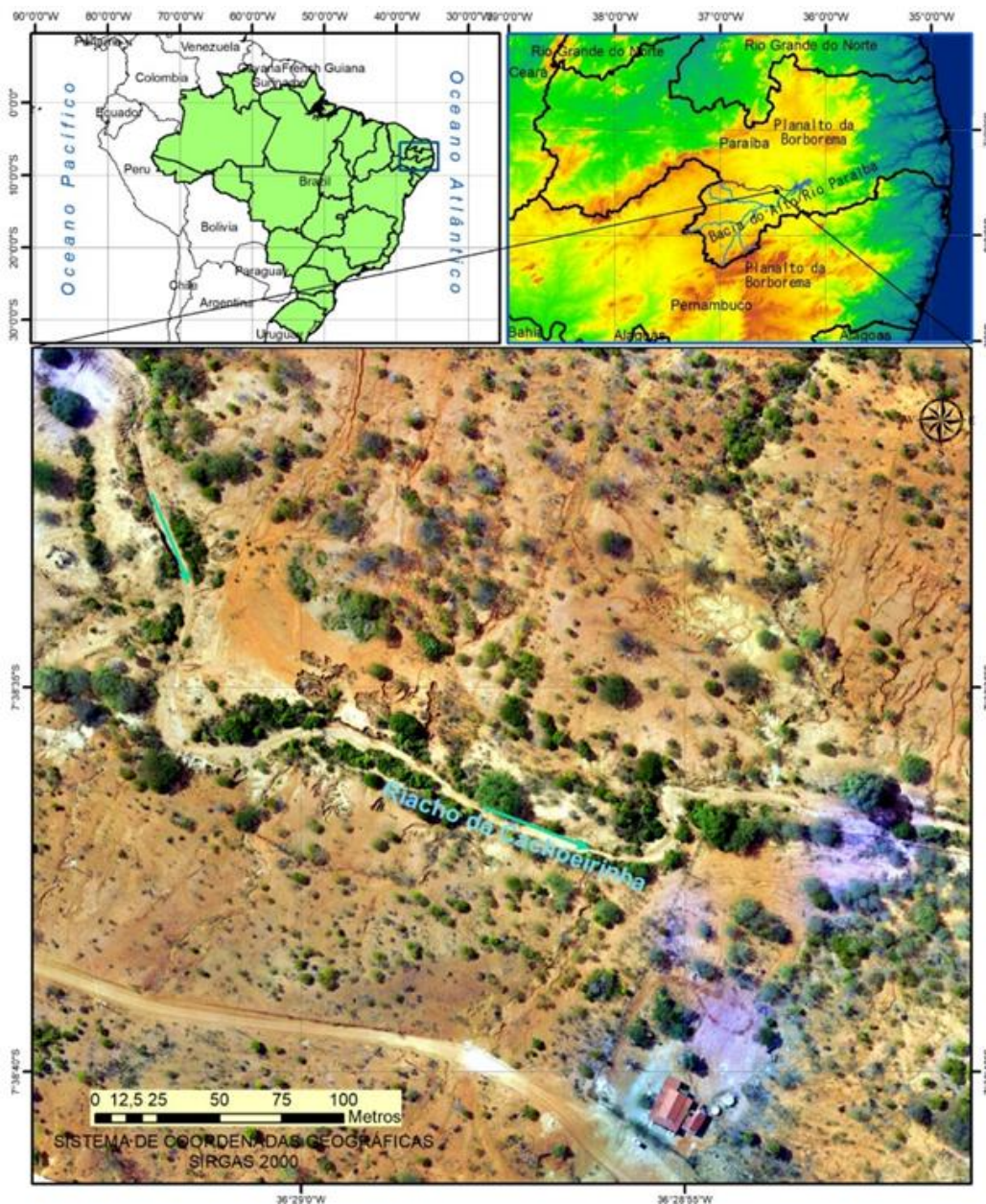


Figura 1. Localização da área de estudo. Elaborado pelos autores, 2023.

A vegetação está representada pela Caatinga hiperxerófila (BRASIL, 1972; SILVA et al., 2017), exibindo arbustos e/ou árvores de 3 a 9 m de altura, que perdem suas folhas sazonalmente, além de cactos e gramíneas sazonais, adaptados a condições de escassez hídrica, cobrindo parcialmente o solo (PRADO, 2000; SANTOS et al., 2012), com baixa densidade de cobertura vegetal e pequena biodiversidade, dominando Pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*), Pinhão bravo (*Jatropha molíssima*) e Xique-Xique (*Pilosocereus gounellei*), enquanto nas margens dos riachos intermitentes é marcante a presença da exótica Algaroba (*Prosopis juliflora*) (SOUZA; MENEZES; ARTIGAS, 2015), o que favorece os processos erosivos estudados.

Essa área tem processo de ocupação antiga (desde o século XVII), tendo ao longo do tempo sofrido constantes desmatamentos para expansão da agropecuária e extração de madeira para diversos usos (construção de casas e cercas, produção de carvão e extração de lenha para fins energéticos, tanto domésticos quanto industriais), o que explica o cenário dominante de degradação da cobertura vegetal (SOUZA; SOUZA, 2016). Esses fatores contribuíram para a área encontrar-se em estágio de desertificação (SOUZA; MENEZES; ARTIGAS, 2015; SOUZA; SUERTEGARAY; LIMA, 2009).

2. Materiais e Métodos

O processo de voçorocamento foi levantado em campo, a partir da análise da forma, dos materiais e identificação dos processos que estão ocorrendo (*piping*, movimentos de massa, escoamento superficial, entre outros).

2.1. Levantamento aerofotogramétrico

Para caracterização e classificação das feições erosivas, foram realizados levantamentos aerofotogramétricos com drone (SIDLE et al, 2019; KOCI et al, 2020) em fevereiro de 2020 e em maio de 2022. A partir das fotografias aéreas obtidas, e posterior processamento, foram elaborados ortofotos e modelos digitais do terreno (MDT).

O levantamento das fotografias áreas foi realizado com o auxílio do Mavick Pro e para o planejamento e execução das missões foi empregado o software Pix4D, utilizando como padrão para todas as missões a opção *double grid*, ou seja, na missão o drone sobrevoa a área formando uma grade recobrando todas as áreas com fotos em diferentes ângulos de um mesmo ponto. Desta forma, através de estereoscopia automatizada, torna-se possível a geração de modelos digitais de elevação.

Como configurações para as missões adotou-se o padrão de 60 metros de altitude, com área de sobreposição entre as imagens de 70% e por fim o ângulo da câmera de 80°. Cabe ainda destacar que foram levantados 3 pontos de GNSS (*Global Navigations Satellite System*) em campo para gerar um ajuste planimétrico e altimétrico nos produtos gerados.

Para o processamento das imagens e geração de modelo digital de elevação foi utilizado o software *Agisoft PhotoScan* que segue o seguinte fluxo de trabalho: alinhamento das fotos, geração da nuvem densa de pontos, geração do MDT e por fim o ortomosaico. No alinhamento das fotos é feito o processo de fototriangulação que determina a posição das fotos gerando *tiepoints* e correlacionando-os com o terreno, para isso foi utilizado a *highest*, que permite o melhor nível de alinhamento.

Já a construção da nuvem densa de pontos, teve por objetivo densificar o processo anterior associando ainda mais as imagens e garantindo que espaços vazios fossem preenchidos. Essa opção é que vai determinar a escala do modelo digital de elevação, para ela foi utilizando a opção *high*. Após testes empíricos, foi constatado que era o suficiente para 5cm de resolução espacial do MDT. As opções de maior nível de detalhe foram descartadas devido a escala da pesquisa e por conta de exigirem um grande processamento de hardware. Por fim, foram gerados os MDT e ortofotos com tamanho de pixel de 5cm que foram ajustados através dos pontos de GNSS levantados em campo no SIG.

2.2. Sistema de classificação de “gully”

Para descrever e classificar as voçorocas foi utilizado o *Elementary Gully Classification* (EGC) desenvolvido por Thwaites et al. (2022), que consiste num fluxograma hierárquico para classificar voçorocas. O primeiro nível consiste em definir o tipo dominante, a família e a forma em planta. O segundo nível avalia o grau de conectividade, a seção transversal e características do solo. O terceiro nível determina a dinâmica erosiva, o processo dominante e a morfologia da “cabeça” e das paredes laterais.

2.3. Análise dos solos

Foram abertos dois perfis de solo a fim de representar a diversidade pedológica. Todos os perfis foram descritos e classificados em campo de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) e *World Reference Base Soil Resources* (IUSS Working Group WRB, 2022).

Amostras de cada horizonte foram secas ao ar, destorroadas e tamisadas em peneira de 2 mm previamente às análises de reatividade do solo, textura e teor de matéria orgânica. O pH do solo em água foi determinado em uma solução 1:2,5 (solo: água deionizada). A acidez potencial (H + Al) foi extraída pela solução tamponada de acetato de cálcio (1 mol L⁻¹ pH 7,0) e determinada em solução de NaOH. Os teores de Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ foram determinados por espectrometria de absorção atômica após extração com solução KCl 1 mol L⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017).

Os teores de K⁺, Na⁺ e P (PM) foram determinados por fotometria de chama e espectrometria UV/VIS em solução Mehlich⁻¹. A partir desses resultados foram calculadas a soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺), a capacidade de troca catiônica efetiva (t = SB + Al³⁺), a capacidade de troca catiônica total (T = SB + (H + Al)) e a saturação por bases (V% = SB/ T). O teor de carbono orgânico do solo (COS) foi determinado por digestão ácida de acordo com o método Walkley-Black (SILVA; MENDONÇA, 2007). O teor de nitrogênio total (N) foi determinado pelo método Kjeldahl (TEIXEIRA et al., 2017). A razão C/N foi calculada a partir da divisão entre teores de C e N. A adsorção de fósforo foi mensurada após dosagem do P remanescente (P_{REM}) em solução 60 mg L⁻¹ P. Os teores de areia, silte e argila foram determinados após agitação lenta com 0,1 M NaOH pelo método da peneira-pipeta. As razões areia grossa/areia fina (AG/AF) e areia fina/silte (AF/SI) e silte/argila (SI/AR) foram calculadas para cada horizonte.

Amostras indeformadas de solo foram coletadas com anéis volumétricos no horizonte superficial e subjacente, obedecendo a densidade de raízes. Tais amostras foram utilizadas para determinação da densidade do solo e densidade de partículas pelo método do anel volumétrico e balão (TEIXEIRA et al., 2017). A curva de retenção de água do solo foi mensurada nos potenciais -6, -8, -10, -30, -60, -100, -300 e -1500 kPa através da mesa de tensão e aparelho de Richards (TEIXEIRA et al., 2017). Porosidade total, capacidade de campo, água disponível, água não disponível, água sujeita a drenagem e ponto de murcha permanente foram calculados a partir dos dados obtidos.

Amostras indeformadas dos horizontes diagnósticos foram retiradas para preparo de lâminas delgadas. Para tanto, blocos orientados e preservados coletados em campo foram secos a 40 °C e impregnados com resina de poliéster diluído em 30 % (volume) de monômero de estireno sob vácuo (-5 kPa). Seções finas foram produzidas seguindo os procedimentos recomendados por Fitzpatrick (1984). A descrição das seções finas seguiu as proposições de Stoops (2021) em um microscópio petrográfico. Diâmetros equivalentes mínimos, medianos e máximos foram mensurados para a fração grossa e pedofeições com auxílio do software *JMicroVision* v.1.2.7.

2.4. Análise das chuvas

Não há dados de chuvas na área de estudo. Assim, foram obtidos dados de chuvas dos postos pluviométricos de São Domingos do Cariri (-7,6331/-36,4311), a 5,7 km a leste, e de Caraúbas (-7,7253/-36,4903), a 9 km a sul. Como não há variação de relevo significativa nesse raio, acreditamos ser representativos os dados pluviométricos utilizados. Os dados foram obtidos junto a Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba (AESAs). A classificação das chuvas diárias seguiu a proposta de Gouvea et al. (2018).

3. Resultados

3.1. Mapeamento geomorfológico detalhado

Os processos erosivos lineares predominam na paisagem da área estudada (Figura 2). Foram observados sulcos erosivos, ravinas desconectadas e conectadas a rede fluvial, além de voçorocas. Verificou-se que ocorrem processos erosivos em ambas as encostas. Na encosta a direita do canal fluvial há o predomínio de erosão por ravinamento e, em sua maioria, são conectadas ao canal fluvial.

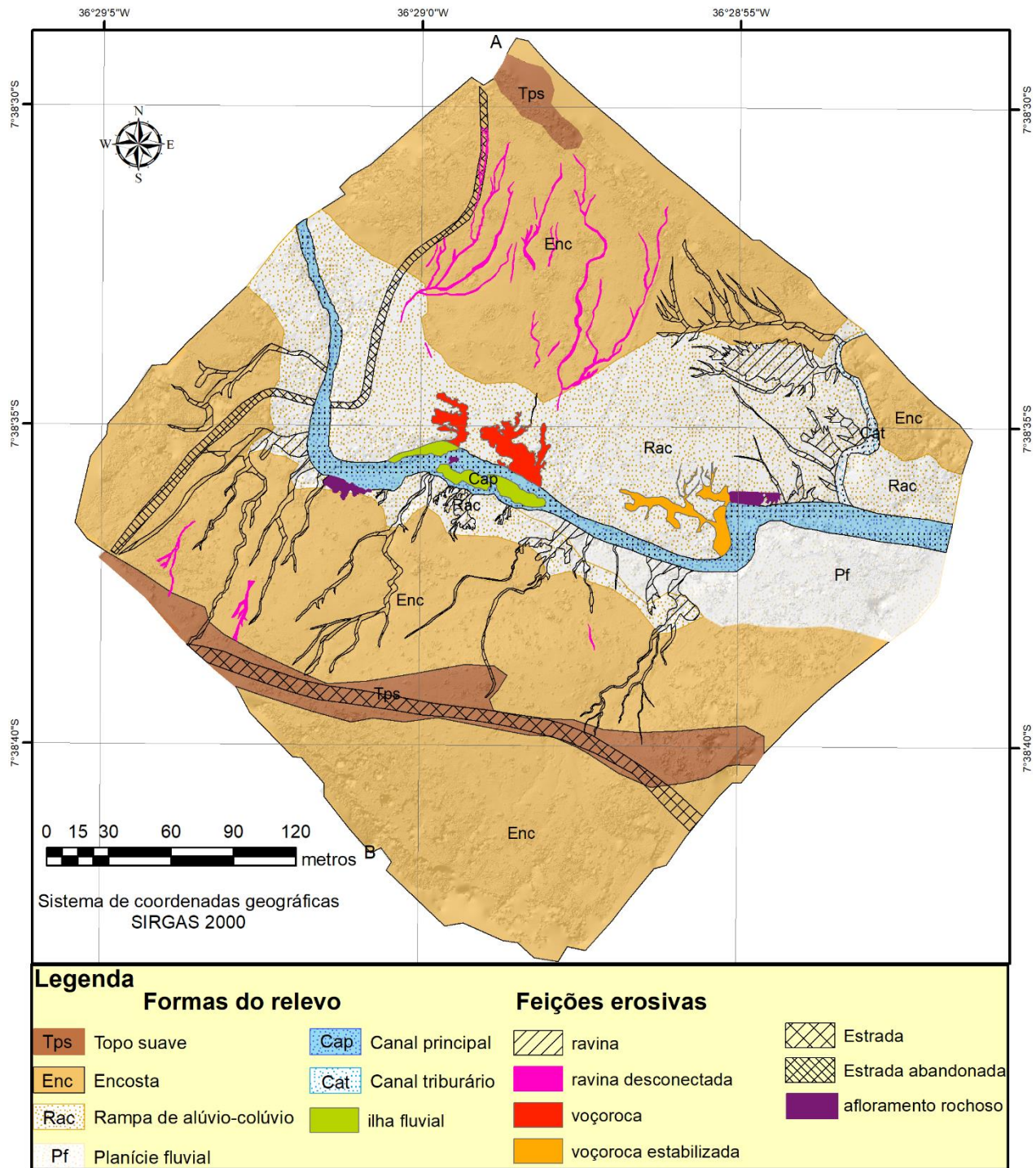


Figura 2. Mapeamento geomorfológico da área de estudo. Elaborado pelos autores, 2023.

Nessa encosta foi observada uma forte relação entre o processo de ravinamento e a estrada de terra adjacente (Figura 2 e 3). A estrada possui o topo do solo compactado e, conseqüentemente, apresenta baixa capacidade de infiltração. Durante as chuvas há o acúmulo de água superficial nas pequenas depressões e nas suas laterais, onde em determinados pontos a água desce a encosta lateral em direção ao canal fluvial. As ravinas iniciam próximas a estrada e se estendem até o canal fluvial.

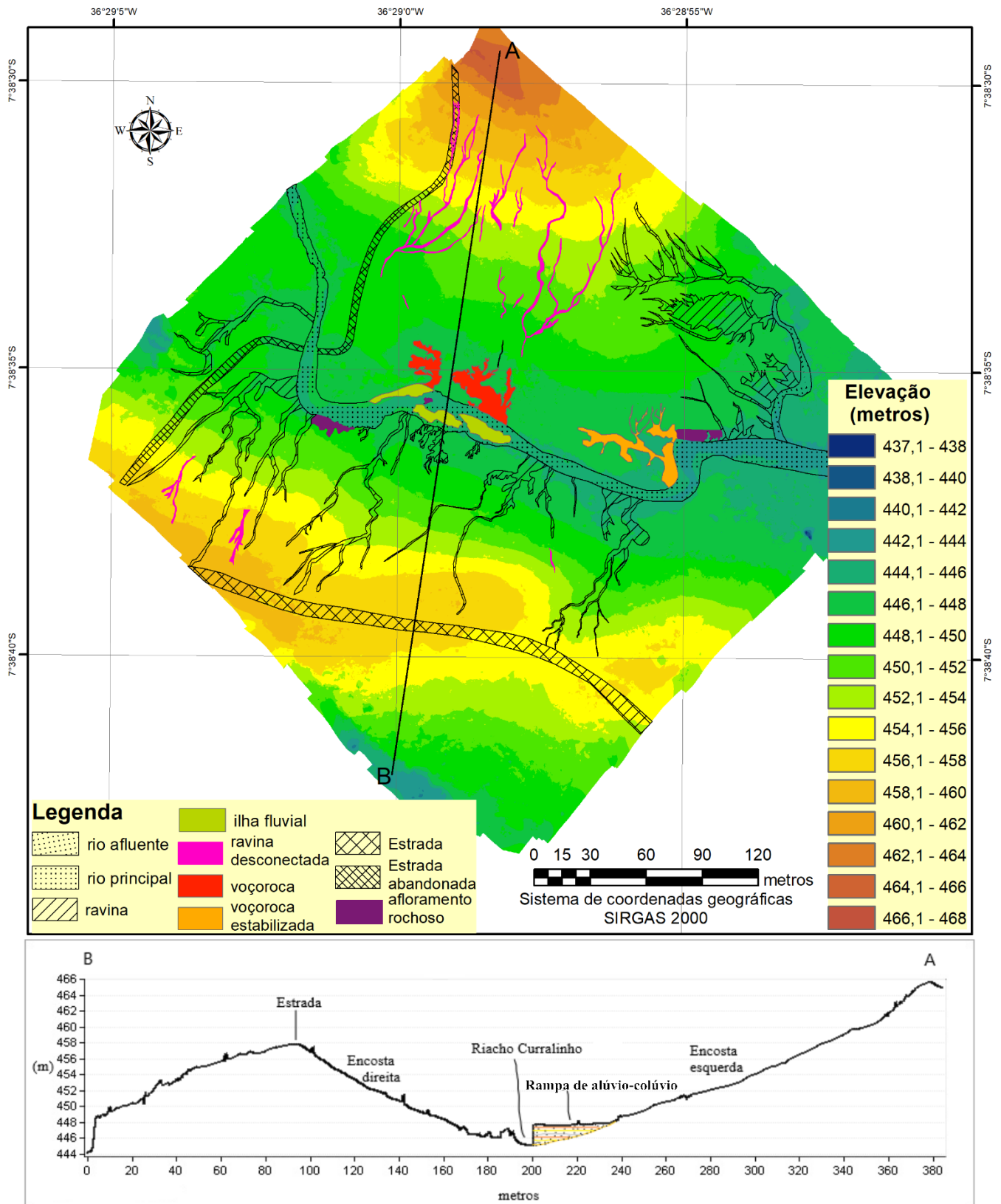


Figura 3. Mapeamento das feições erosivas sobre modelo digital do terreno e perfil transversal. Elaborado pelos autores, 2023.

A encosta esquerda do vale fluvial é mais alta e mais extensa que a encosta direita (Figura 3). O processo erosivo dominante é também o de ravinamento, entretanto, predominam as ravinas desconectadas do canal fluvial. Esse processo de ravinamento é derivado da ocorrência de fluxos hortonianos, e se estende até o

contato da encosta com a rampa de alúvio-colúvio adjacente. A interrupção das ravinas ao entrarem no domínio fluvial, sugere que os fluxos superficiais infiltram no depósito, devido a topografia plana, que diminui a velocidade do escoamento, e a presença de solos arenosos.

No domínio fluvial, o riacho da Cachoeirinha apresenta-se assoreado, o que é típico de rios do semiárido, e com a presença de um depósito aluvio-fluvial com 2 ha de área e espessura máxima de 2,8 metros. Uma rampa suave formada por depósitos aluvio-coluviais conecta a encosta esquerda ao canal fluvial. Nesse depósito, foi possível observar a ocorrência de 3 voçorocas, sendo duas ativas e uma estabilizada.

3.2. Classificação do voçorocamento

As três voçorocas ocorrem em diferentes pontos ao longo de uma rampa de alúvio-colúvio adjacente ao rio da Cachoeirinha, afluente do rio Currálinho, tributário do Rio Paraíba. Apresentam forma dendrítica em planta (Tabela 1), o que sugere uma ramificação de fluxos subsuperficiais responsáveis pela expansão de vários dígitos. Todas as voçorocas estão conectadas ao canal fluvial adjacente. Elas se iniciaram na margem esquerda do canal, e evoluíram regressivamente em direção a encosta. Apresentam formas semelhantes com bordas escarpadas e fundo suavemente plano, dando o formato de “U” (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação e caracterização do voçorocamento.

Critério	Voçoroca 1	Voçoroca 2	Voçoroca 3
Tipo dominante	Permanente em fundo de vale sobre depósitos aluviais	Permanente em fundo de vale sobre depósitos aluviais	Permanente em fundo de vale sobre depósitos aluviais
Forma em planta	Dendrítica	Dendrítica	Dendrítica
Conectividade	Conectada	Conectada	Conectada
Seção transversal	Forma de “U”	Forma de “U”	Forma de “U”
Características do solo	Textura argiloarenosa, estrutura moderada, transição entre horizontes plana e clara, e descontinuidades litológicas	Textura argiloarenosa, estrutura moderada, transição entre horizontes plana e clara, e descontinuidades litológicas	Textura argiloarenosa, estrutura moderada, transição entre horizontes plana e clara, e descontinuidades litológicas
Dinâmica erosiva	Ativa	Ativa	Estável
Processo dominante	<i>Seepage erosion</i> e movimentos de massa nas bordas	<i>Seepage erosion</i> e movimentos de massa nas bordas	Erosão laminar e em sulcos
Morfologia da “cabeça”	Escarpada	Escarpada	Gradual
Morfologia das paredes laterais	Vertical	Vertical	Inclinada

Em relação a morfodinâmica, a voçoroca 3 (V3) situada mais a jusante do rio, encontra-se estabilizada. A voçoroca 2 (V2), entre as duas outras, está em baixa atividade de expansão, e a voçoroca 1 (V1), a mais a montante das três, encontra-se em alta atividade regressiva. Os principais processos erosivos observados foram a *seepage* (erosão por vazamento), o *piping* (erosão em túneis) e movimentos de massa nas bordas.

3.3. Caracterização morfométrica do voçorocamento

Na área foram identificadas 3 voçorocas, sendo 2 ativas (V1 e V2) e 1 estabilizada (V3). A V1 é a que visualmente mais avança (Figura 4), apresentou no primeiro levantamento uma extensão máxima de 36 metros, área 250 m², perímetro 208 metros e profundidade máxima de 2,3 metros (Tabela 2). A V2 é a maior em área, porém é menos profunda que a V1. A V3 é a mais rasa e está estabilizada.

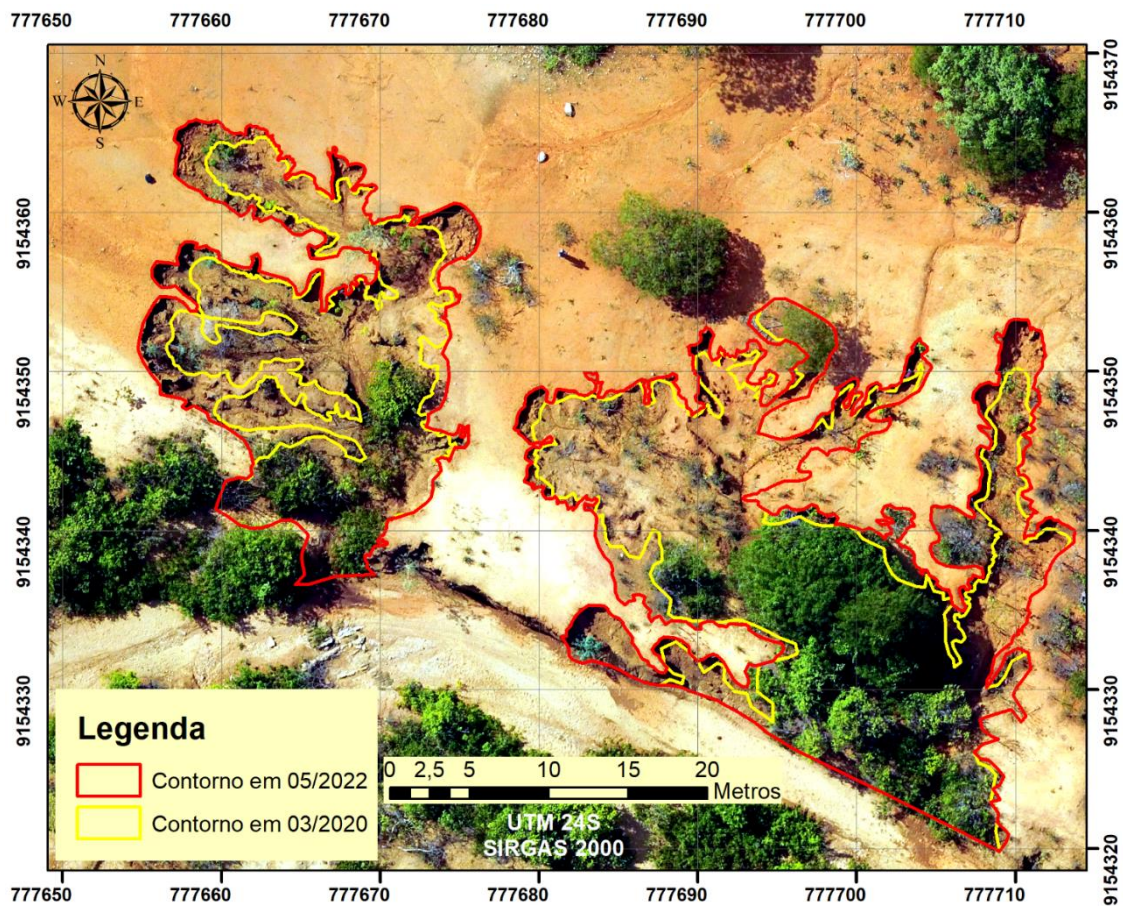


Figura 4. Evolução das voçorocas 1 (esquerda) e 2 (direita) entre 2020 e 2022. Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 2. Parâmetros morfométricos das voçorocas em 2020 e 2022.

Feição erosiva	Extensão máxima (m)		Área (m ²)		Perímetro (m)		Profundidade máxima (m)	
	2020	2022	2020	2022	2020	2022	2020	2022
Voçoroca 1	36,1	38,4	250,13	347,75	208,33	170,31	2,3	1,9
Voçoroca 2	39,2	40,5	462,95	573,66	288,21	334,37	1,8	1,8
Voçoroca 3	60,1	60,1	388,38	388,38	223,43	223,43	1,1	1,1

A análise comparativa entre os levantamentos de 2020 e 2022, permitiu verificar o que foi observado nas condições de campo. A V3 não apresentou mudança no período. A V1 avançou linearmente 2,3 metros e cresceu 97,6 m² em área (Tabela 2), o que representa um aumento de 39% da forma. A V2 avançou 1,3 metros em extensão, e 110,7 m² em área, configurando uma ampliação de 23,9% da sua área.

A V1 teve seu perímetro diminuído, o que é explicado pela coalescência de três dígitos, reduzindo a sinuosidade do seu contorno. Em relação a profundidade, foi observado variação apenas na V1, pois devido a intensa morfodinâmica das paredes laterais e da cabeceira, houve grande produção de sedimentos, ocasionando o assoreamento do seu interior.

3.4. Morfologia e propriedades físico-químicas dos solos

Os perfis de solo foram descritos em uma rampa de alúvio-colúvio, entre 427 e 440 m de altitude. (Tabela 3; Figura 5). Os pedons foram classificados como Cambissolo Flúvico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (correspondentes aos *Fluvisols*, de acordo com WRB), e como Luvisolo Háptico (*Luvisols*). O horizonte diagnóstico superficial A fraco foi identificado em ambos os pedons. A espessura do horizonte

superficial varia entre 7 e 30 cm. Os solos variam de profundos a muito profundos e a transição entre horizontes é tipicamente plana e clara.

Tabela 3. Descrição Geral dos solos.

Perfil	Classificação do solo (SiBCS)	Coordenadas	Altitude (m)	Descrição geral
P1	CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico	07° 38' 35,5" S 36° 28' 59,4" W	427	Localizado numa rampa de alúvio-colúvio com declividade variando entre 0 e 5°. Solo bem drenado, com erosão muito forte à forte (presença de voçorocas) e derivado de material aluvionar. Cobertura original de Caatinga Hiperxerófila e uso atual de pastagem.
P2	LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico	07° 38' 33,8" S 36° 36' 60,4" W	440	Localizado numa rampa de alúvio-colúvio com declividade variando entre 0 e 5°. Solo bem drenado, com erosão laminar aparente e derivado de material aluvionar. Cobertura original de Caatinga Hiperxerófila e uso atual de pastagem.

A textura varia entre areia franca e argilo-arenosa, com dominância da areia grossa entre as partículas finas (Tabela 4). Os pedons são levemente ácidos a moderadamente alcalinos, com saturação por bases superior a 85% em todos os horizontes (Tabela 5). $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+} > K^{+}$ é a sequência de dominância catiônica. Distribuição errática do teor de P_M , P_{REM} , CO, N, bases e textura indicam caráter flúvico em ambos os perfis (Tabela 5).

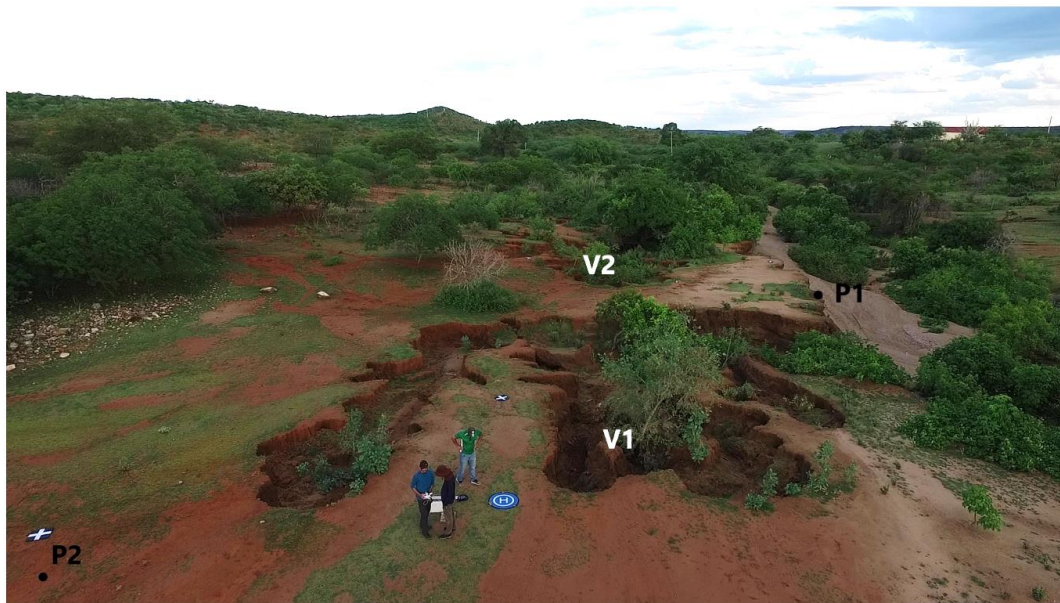


Figura 5. Fotografia da área de estudo com a localização dos perfis de solos. Fonte: Os autores, 2023.

Tabela 4. Propriedades físicas dos solos.

Hor.	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classe textural
-----kg/kg-----						
P1 – CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico						
A	0-30	0,210	0,243	0,263	0,285	Franco-argiloarenosa
2Bi1	30-83	0,163	0,310	0,208	0,319	Franco-argiloarenosa
3Bi2	83-130	0,292	0,169	0,177	0,363	Argiloarenosa
4Bi3	130-170	0,206	0,312	0,191	0,291	Franco-argiloarenosa
5Bi4	170-220	0,262	0,248	0,203	0,287	Franco-argiloarenosa

5Bi ₅	220-240+	0,565	0,163	0,090	0,182	Franco arenosa
P2 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico						
A	0-7	0,524	0,165	0,124	0,187	Franco arenosa
AB	7-20	0,427	0,220	0,145	0,208	Franco-argiloarenosa
Bt ₁	20-45	0,227	0,236	0,238	0,299	Franco-argiloarenosa
Bt ₂	45-60	0,207	0,210	0,238	0,345	Franco argilosa
C	60-75+	0,214	0,210	0,228	0,348	Franco argilosa

Hor.: Horizontes. Prof.: Profundidade.

O primeiro perfil de solo (P1) foi classificado como um CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico/*Fluvic Yermic Eutric Cambisol (Loamic, Endoclayic, Ochric, Raptic)*. O P1 foi descrito em uma planície fluvial a 427 m. Não há cobertura vegetal ou serrapilheira sobre o solo. O solo é bem drenado, com cores variando entre marrom escuro (7.5YR 3/3) e marrom amarelado escuro (10YR 3/4). A estrutura é predominantemente moderada pequena a média e varia entre apédica (maciça, grãos simples), blocos angulares, blocos subangulares, prismática e laminar. A consistência é predominantemente ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. A textura do P1 é predominantemente franco-argiloarenosa, e areia grossa e areia fina revezam como partículas dominantes em cada horizonte. Razões erráticas de AG/AF, AF/SI (Figura 6), CO indicam descontinuidades litológicas em 30, 83, 130 e 170 cm de profundidade.

O primeiro horizonte do P1 (A – 0-30 cm de profundidade) é marrom escuro (7.5YR 3/3) e sua estrutura é moderada, pequena, de blocos subangulares. O segundo horizonte (Bi₁ – 30-83 cm) é marcado por um incremento dos teores de areia fina e argila em comparação com o primeiro horizonte. O terceiro horizonte (Bi₂) registra o maior teor de argila no perfil e os menores teores de areia grossa e areia fina. Esse horizonte destaca-se também por apresentar transição ondulada com o horizonte subjacente, com profundidades modais entre 83 e 130 cm e variando entre 120 e 135 cm. O quarto horizonte (Bi₃ – 130-170 cm) marca os maiores teores de areia fina no perfil, com decréscimo do teor de argila. O quinto horizonte (Bi₄ – 170-220 cm) registra um incremento dos teores de areia grossa, atingindo equilíbrio entre areia grossa e areia fina. O sexto horizonte (Bi₅ – 220-240+ cm) marca dominância da fração areia grossa sobre as demais.

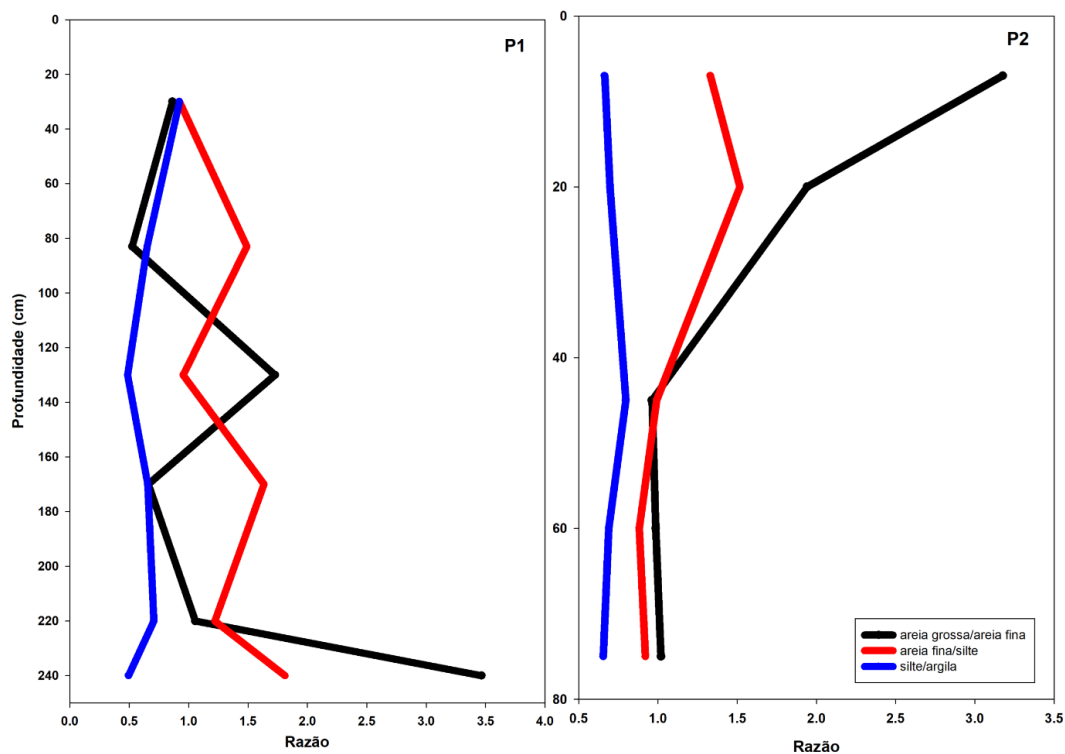


Figura 6. Razões granulométricas dos perfis de solos. Elaborado pelos autores, 2023.

O segundo perfil (P2) foi classificado como um LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico/*Yermic Luvisol* (*Pantoloamic, Hypereutric, Epic, Ochric, Raptic*). O P2 foi descrito em uma rampa de alúvio-colúvio a 440 m. Não há cobertura vegetal ou serrapilheira sobre o solo. O solo é bem drenado, com cores variando entre preto (5YR 2.5/1) e marrom escuro (7.5YR 3/4). A estrutura é predominantemente moderada pequena a média e com blocos subangulares. A consistência é predominantemente ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. A textura do P2 é predominantemente franca, com incremento de argila em profundidade. Razões erráticas de AG/AF, AF/SI (Figura 6), CO indicam descontinuidades litológicas em 20 cm de profundidade.

O primeiro horizonte do P2 (A – 0-7 cm de profundidade) é marrom vermelho escuro (5YR 3/3) e sua estrutura é fraca, pequena e em blocos subangulares. Os horizontes subjacentes são marcados por pelo decréscimo do teor de areia grossa e incremento do teor de CO em comparação com o primeiro horizonte (Tabelas 4 e 5; Figura 6).

A densidade de partículas variou entre 2,60 e 2,90 kg dm⁻³, indicando dominância de quartzo e feldspatos na mineralogia. A densidade do solo aumentou com o incremento da profundidade nos dois perfis (Tabela 6). A porosidade total registrou comportamento inverso. Os valores de potencial matricial indicam valores similares entre os percentuais de água disponível e água não disponível. Embora o percentual de água drenada decresça com aumento da profundidade em ambos os perfis, os valores no P2 são sensivelmente menores (Tabela 6).

A estrutura em blocos angulares do horizonte Bt2 pode ser atribuída ao processo de expansão e contração do horizonte durante os ciclos de umedecimento e secagem (ZECH et al., 2022). Durante a estação seca, a desidratação do solo, por evapotranspiração, induz contração da massa sólida, que ocorre de forma intensa em função da expressão de argilas de alta atividade. Tal processo induz o fendilhamento vertical e horizontal do solo, construindo agregados equidimensionais, de faces planas e arestas aguçadas. Durante a estação úmida, a hidratação do solo, por infiltração da água pluviométrica, induz a expansão da massa sólida. Em função da maior superfície específica das argilas, em comparação à grãos de silte e mais grossos, a sua expansão produz uma distribuição relativa com partículas grossas incorporadas à uma matriz fina.

O horizonte Bt₂ (45-60 cm) do P2 possui estrutura em blocos angulares formando uma razão g/f porfírica de distribuição referida, com grãos de feldspato e quartzo e poros planares (Figura 7). Grãos de tamanho silte a areia grossa arestados compõem a fração grossa. Esses grãos são distribuídos aleatoriamente na fração fina. A fração fina possui cor neutra nas zonas próximas aos poros e marrom escuro no interior dos agregados e feições de revestimento. Feições de revestimento típicas recobrem grãos da fração grossa, formando extinção granoestriada e em mosaico. Nódulos disórticos de ferro não relacionados também são encontrados (Figura 7).

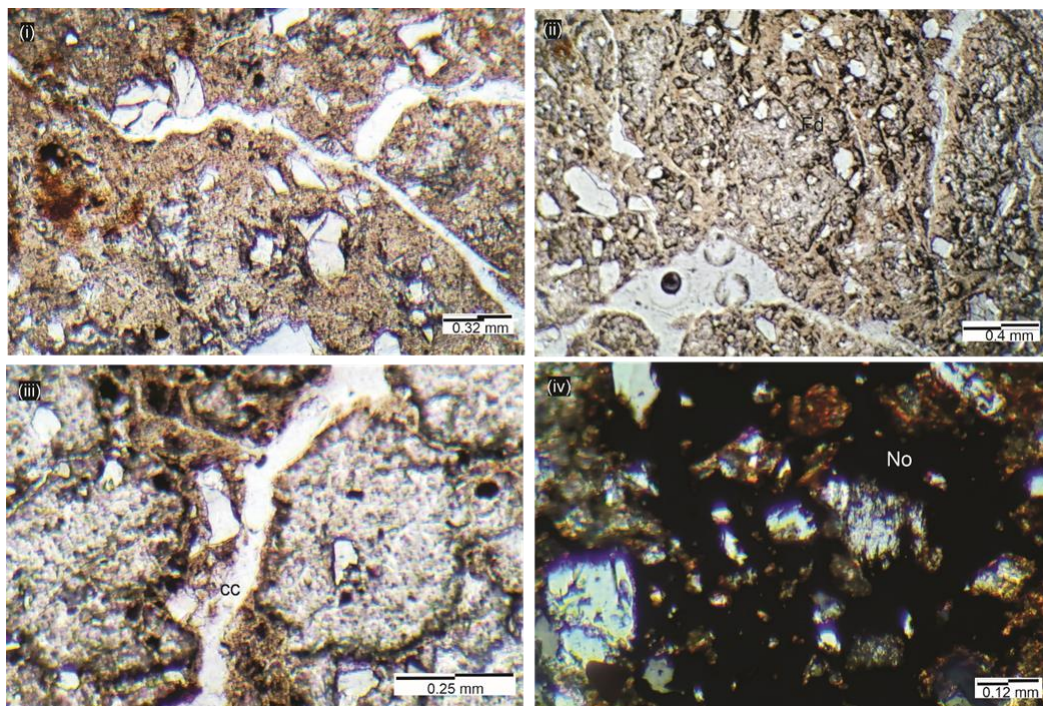


Figura 7. Fotomicrografias de seções finas do horizonte Bt₂ do P2: poros planares sem evidência de revestimento ou preenchimento (i), cores neutras nas paredes de agregados adjacentes a poros (ii), tímidos revestimentos de poros (iii), nódulos de ferro (iv). Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 5. Propriedades químicas dos solos.

H	Prof. (cm)	H ₂ O pH	KCl pH	ΔpH	P _m	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m	ISNa	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
P1 – CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico																					
A	0-30	7,47	6,01	-1,46	19,2	97	42	11,50	3,62	<0,1	0,4	15,55	15,55	15,95	97,5	0,0	1,14	0,98	0,05	19	39,7
B _{ti}	30-83	7,64	5,97	-1,67	28,8	101	76	11,33	4,84	<0,1	0,4	16,76	16,76	17,16	97,7	0,0	1,93	0,65	0,04	19	43,6
B _{t2}	83-130	7,08	6,00	-1,08	33,6	105	128	11,37	5,60	<0,1	0,4	17,80	17,80	18,20	97,8	0,0	3,06	0,23	0,05	5	44,6
B _{t3}	130-170	7,48	6,15	-1,33	24,5	105	162	10,55	6,17	<0,1	0,1	17,69	17,69	17,79	99,4	0,0	3,96	0,23	0,03	89	42,4
B _{t4}	170-220	8,39	6,50	-1,89	27,0	97	134	10,00	5,48	<0,1	<0,1	16,31	16,31	16,11	101,2	0,0	3,62	0,43	0,02	22	44,4
B _{t5}	220-240+	8,34	6,41	-1,93	28,0	77	76	6,35	3,38	<0,1	<0,1	10,26	10,26	10,26	100,0	0,0	3,22	0,20	0,02	11	49,6
P2 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico																					
A	0-7	7,26	4,58	-2,68	4,2	45	8	6,86	4,63	<0,1	1,0	11,64	9,89	12,64	92,1	0,0	0,28	0,42	0,03	12	46,9
AB	7-20	7,31	5,13	-2,18	14,0	69	10	6,45	3,22	<0,1	0,9	9,89	15,05	10,79	91,7	0,0	0,40	0,46	0,04	11	45,0
B _{ti}	20-45	7,58	5,33	-2,25	14,9	71	42	10,66	4,03	<0,1	0,8	15,05	17,77	15,85	95,0	0,0	1,15	0,70	0,05	15	42,9
B _{t2}	45-60	6,90	5,70	-1,20	19,8	103	58	12,74	4,51	<0,1	0,7	17,77	18,90	18,47	96,2	0,0	1,37	0,68	0,05	14	40,2
C	60-75+	6,41	5,46	-0,95	21,7	101	60	13,33	5,05	<0,1	0,6	18,90	9,89	19,50	96,9	0,0	1,34	0,72	0,05	16	42,1

Tabela 6. Propriedades de amostras indeformadas dos solos.

Horizonte	Prof. (cm)	Densidade de partículas	Densidade do solo	Porosidade total	Potencial matricial (kPa)	Água disponível	Água não disponível	Água drenada
P1 – CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico								
A	0-30	2,71	1,57	0,421	46	6	3	37
B _i	30-83	2,72	1,64	0,397	40	7	2	33
P2 - LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico								
A	0-7	2,90	1,42	0,510	48	24	14	22
AB	7-20	2,67	1,58	0,408	41	12	4	26
B _{ti}	20-45	2,63	1,56	0,407	41	13	5	25
B _{t2}	45-60	2,60	1,63	0,373	37	22	12	12
C	60-75+	2,74	1,66	0,394	39	24	13	15

3.5. Análise das chuvas

O intervalo entre os dois levantamentos aerofotogramétricos foi de 2 anos e 57 dias (787 dias no total). Nesse período, o total acumulado de chuva em São Domingos do Cariri foi de 1190,8 mm e em Caraúbas 948,7 mm. Dos 787 dias entre os dois monitoramentos, ocorreram 99 dias com chuvas em São Domingos do Cariri e 64 em Caraúbas (Tabela 7). Dos dias com chuvas, cerca de 58% foram de menos de 10 mm em ambas as estações. As chuvas diárias com volumes superiores a 50 mm foram apenas 4 em São Domingos do Cariri e 3 em Caraúbas. Apenas em Caraúbas foi registrado uma chuva diária superior a 100 mm.

Tabela 7. Chuvas diárias em São Domingos do Cariri e em Caraúbas.

Classes de chuvas diárias	São Domingos do Cariri		Caraúbas	
	Número de dias	%	Número de dias	%
Sem chuvas	688	87,4	723	91,8
Com chuvas	99	12,6	64	8,2
P < 10 mm	58	58,6	37	57,8
10 mm ≤ P < 15 mm	13	13,1	8	12,5
15 mm ≤ P < 25 mm	16	16,2	9	14,1
25 mm ≤ P < 50 mm	8	8,1	6	9,4
50 mm ≤ P < 100 mm	4	4,0	3	4,7
P ≥ 100 mm	0	0	1	1,5
Total da série	787	100	787	100

A maior chuva diária registrada ocorreu no dia 17 de fevereiro de 2021 nas duas localidades, com um total de 135 mm em Caraúbas e 82,2 mm em São Domingos do Cariri (Figura 8). Levando em consideração a distribuição das chuvas diárias nas duas localidades, considera-se que a área do voçorocamento tenha sido palco de apenas 4 chuvas superiores a 50 mm dentro do intervalo de tempo monitorado. Essa característica corrobora com o caráter episódico evolutivo do processo de voçorocamento na área. O regime de chuvas concentradas sobre encostas com pouca cobertura vegetal produz altas taxas de escoamento superficial, como também apontado por Xavier (2021).

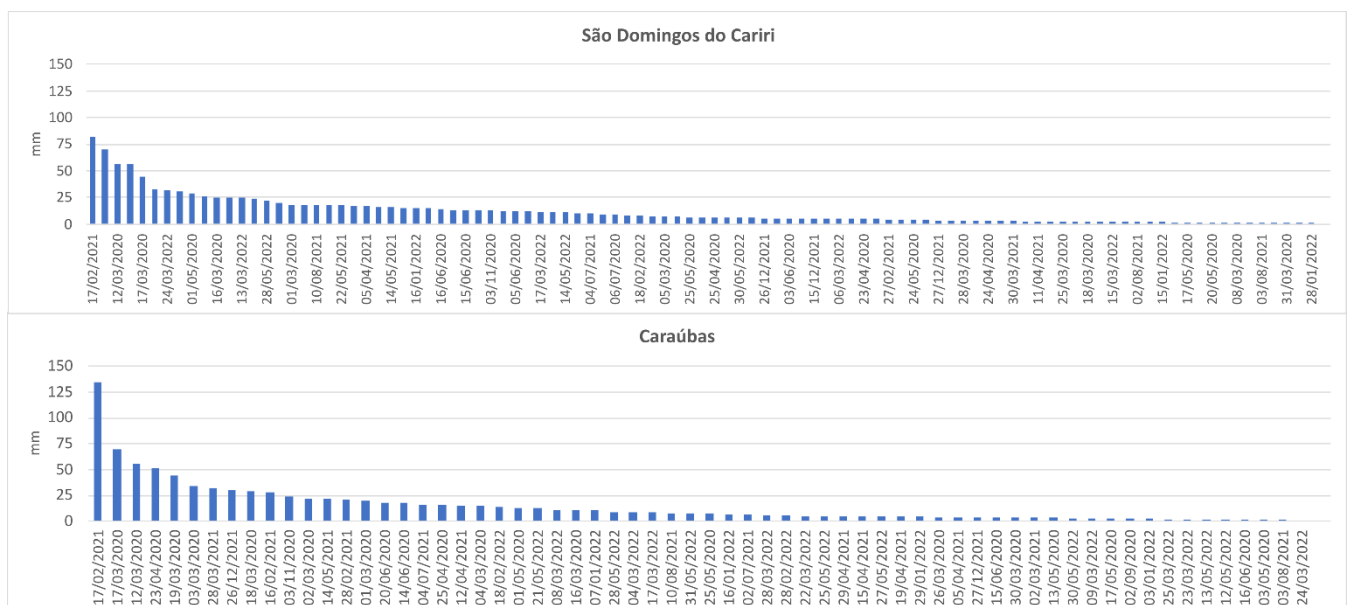


Figura 8. Chuva diária registrada em ordem decrescente de volume. Elaborado pelos autores, 2023.

4. Discussão

A formação de voçorocas no semiárido sobre rochas cristalinas é pouco frequente e depende de condições hidrogeomorfológicas específicas. As voçorocas estão localizadas em depósitos em rampa alúvio-colúviais conectados a encosta adjacente. No domínio das encostas ocorrem feições do tipo sulcos e ravinas, associados ao

escoamento superficial do tipo hortoniano. Em função da baixa cobertura do solo e ocorrência de chuvas torrenciais, o atrito de gotas de chuva diretamente sobre os agregados do solo produz o efeito *splash*, gerando a quebra dos agregados. A desagregação favorece remoção de partículas finas (areia, silte e argila) do horizonte superficial pelo escoamento superficial (LOBATO et al., 2009; SANTOS et al., 2016).

Durante os eventos de precipitação, fluxos hortonianos nas encostas desembocam na rampa de alúvio-colúvio e somam-se a precipitação que cai diretamente sobre este compartimento. As encostas funcionam como bacias de captação hídrica durante as chuvas e fonte de sedimentos para os depósitos no domínio fluvial-sopé da encosta.

Ao atingir a rampa deposicional, esse *input* hídrico vindo das encostas infiltra no solo. A presença de diversas ravinas na encosta e nenhuma sobre a rampa comprova que os fluxos passam de superficiais para subsuperficiais (Figuras 2, 3, 9 e 10). A infiltração é favorecida pela topografia de baixa declividade e alta porosidade do horizonte superficial. O enriquecimento relativo de silte, areia e cascalho no horizonte superficial produz elevada porosidade e permeabilidade (OLIVEIRA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2009).

Os solos da rampa de alúvio-colúvio apresentam significativas discontinuidades texturais em função do material de origem ser construído a partir da interdigitação de camadas de sedimentos alúvio-colúvial (encosta) e fluviais (rio), e da ocorrência de processos pedogenéticos. A ausência de cerosidade, pedofeições de revestimento e preenchimento no horizonte B textural indica ausência do processo de lessivagem (KÜHN et al., 2018) e reforça que a diferença de porosidade entre horizontes A e Bt é atribuída ao processo de elutriação. Entretanto, tal processo é limitado aos horizontes superficiais.



Figura 9. Processos geomorfológicos na encosta e na rampa. A) Contexto Encosta-Rampa; B) Feição de túnel erosivo (piping); C) Processos nas bordas. Fonte: Os autores, 2023.

O decréscimo de porosidade e permeabilidade em profundidade, especialmente no horizonte B textural, proporciona a geração de níveis de água subsuperficiais efêmeros. Esse contexto morfológico e de material específico possibilita, mesmo que efemeramente, o fluxo subsuperficial saturado (BRACKEN; CROKE, 2007). Tal diferença reduz a velocidade e intensidade de migração vertical de água. Nódulos de ferro e cores gleizadas na

parede de agregados adjacentes a poros indicam estagnação de água em subsubsuperfície e níveis de água subsuperficiais efêmeros (MÜCHER et al., 2018).

Mesmo em condições de baixa amplitude altimétrica e declividade, essa água escoar lateral e subsuperficialmente ao encontrar os horizontes Bt. Esses fluxos subsuperficiais efêmeros exfiltram em diferentes pontos do canal fluvial e, onde há maior concentração e frequência de fluxo, geram erosões do tipo *seepage* e *piping*. Esses processos estão mais relacionados à saturação de parte do solo (POESEN et al., 2003). A remoção de solo em subsuperfície ocorre até o rompimento da sustentação dos horizontes superiores e, conseqüente colapso da superfície (Figuras 9 e 10). A margem do canal fluvial, delimitada pela parede do depósito, é a face primeira de exfiltração, ou seja, é onde se origina a voçoroca.

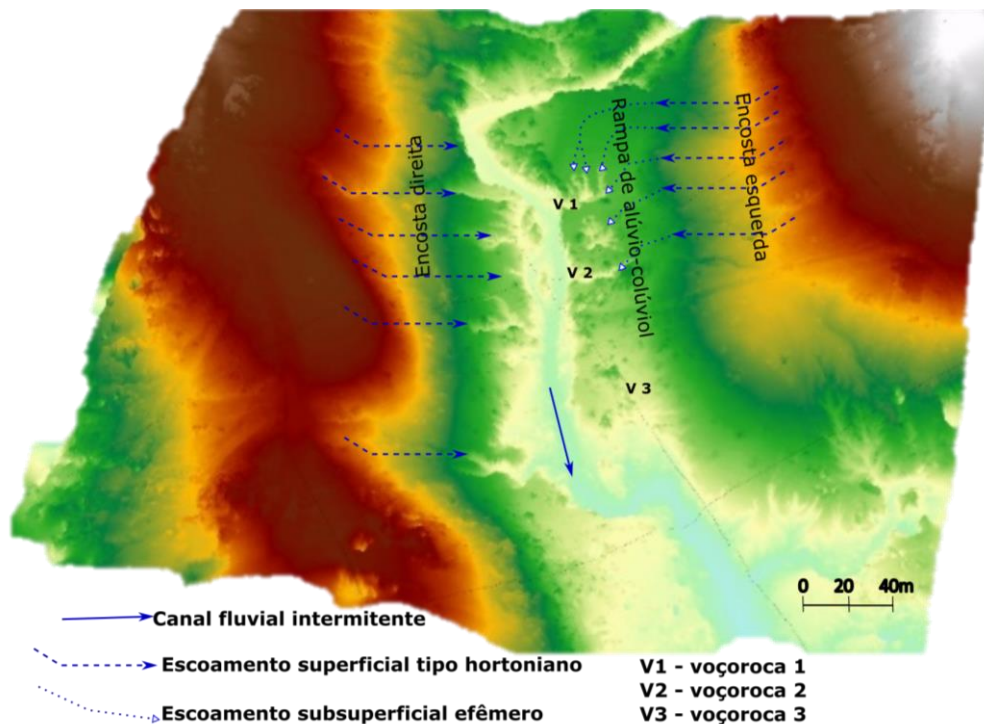


Figura 10. Modelo esquemático dos processos hidro-erosivos e voçorocamento. Elaborado pelos autores, 2023.

Chaplot (2013), em estudos realizados no sopé das montanhas Drakensberg, província de KwaZulu-Natal, África do Sul, sugere que a evolução das voçorocas se desenvolve preferencialmente ao longo de discontinuidades pedológicas, ou seja, o Luvissole e o Argissolo na parte superior da área estudada, e atuação do fluxo subsuperficial (*piping*). Sonneveld, Everson e Veldkamp (2005), evidenciam em estudos feitos na bacia hidrográfica de Okhombe, localizada na província de KwaZulu-Natal, África do Sul, que a discontinuidade textural entre horizontes mais permeáveis e menos permeáveis originam os fluxos subsuperficiais – túneis (*piping*).

Após a abertura das voçorocas, elas evoluem regressivamente em direção ao topo da rampa e da base da encosta, guiados e alimentados pelos fluxos subsuperficiais que ocorrem nos contatos entre horizontes com significativas discontinuidades texturais (FOX et al., 2007; FOX; WILSON, 2010). A tendência é o voçorocamento dissecar todo o depósito e atingir a base da encosta, se conectando ao sistema de ravinas principais. Nesse momento, o processo de voçorocamento ser interrompido e o sistema torna-se a operar apenas por fluxos superficiais, como predomina em áreas secas (KOCI et al., 2020).

Se a água oriunda do escoamento superficial nas encostas é fundamental para alimentar os fluxos subsuperficiais e, conseqüentemente, o processo de voçorocamento, é provável que o processo de ocupação e desmatamento da caatinga tenha contribuído para acelerar o voçorocamento. Tebebu et al. (2010) observaram que as voçorocas nas Terras Altas da Etiópia ocorreram em resposta à remoção da vegetação nativa que alterou a hidrologia da região de tal forma que o lençol freático subiu e o fluxo subterrâneo das encostas para os vales aumentou. Nesta mesma região, Zegeye et al. (2016) relataram que a elevação do lençol freático raso, foi o principal fator para um aumento de quatro vezes na erosão da voçoroca. Eles atribuíram esse efeito à diminuição da resistência ao cisalhamento e à erosão induzida por infiltração.

As três voçorocas identificadas, encontram-se em dinâmicas erosivas diferentes. A V3, a mais a jusante em relação ao rio, está estabilizada, com ausência de colapso das paredes laterais e significativa presença de vegetação. Sugere-se que é a mais antiga, e foi diminuindo sua dinâmica com o surgimento da V2 e, posteriormente da V1, a mais recente. A origem da V2 resultou da mudança das rotas de fluxos subsuperficiais em direção a montante em relação ao rio, assim, foi gradativamente deixando a V3 desprovida de fluxos hídricos subsuperficiais. O mesmo aconteceu quando surge a V1 em relação a V2 (Figura 11).

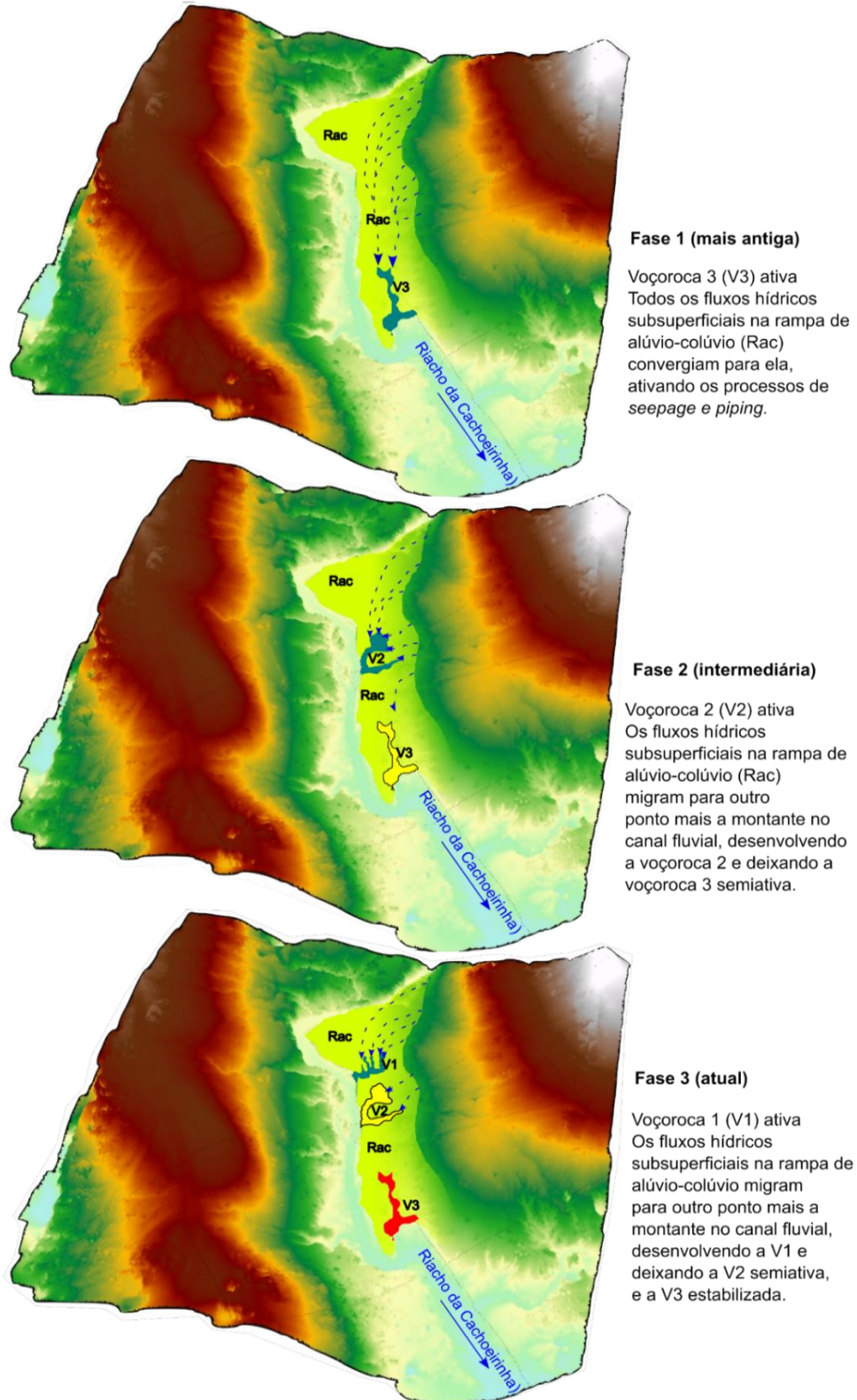


Figura 11. Esquema evolutivo do processo de voçorocamento na rampa deposicional. Elaborado pelos autores, 2023.

Silva (2007) relata que bruscas mudanças verticais tanto na morfologia como no diâmetro dos poros podem trazer sérios problemas de erosão, principalmente em solos com descontinuidades texturais e estruturais abruptas. Horizontes superficiais de textura arenosa, e horizontes subsuperficiais de textura argilosa, que nesse caso em particular, observa-se maior velocidade de infiltração da água no horizonte superficial (mais arenoso), e sofre uma drástica redução quando entra em contato com o horizonte argiloso (horizonte B), assim o horizonte superficial fica encharcado e inicia-se o movimento horizontal lateral, podendo provocar erosão (PODWOJEWSKI et al., 2020; SONNEVELD; EVERSON; VELDKAMP, 2005).

As rotas dos fluxos subsuperficiais dentro do depósito determinam os caminhos da evolução do voçorocamento. Como são fluxos derivados da infiltração do escoamento superficial e da chuva direta sobre o depósito, os fluxos subsuperficiais são efêmeros e podem mudar de direção com frequência. Essa dinâmica produz certa complexidade espaço-temporal na evolução das formas, gerando constantes estabilizações, ativações e reativações em diferentes pontos.

5. Conclusões

A proposição do modelo de voçorocamento para o semiárido brasileiro, sobre depósitos alúvio-colúviais no Planalto da Borborema, traz luz para o estudo de avançado estágio de degradação desses sítios. O rápido avanço das voçorocas em curto período de tempo ressalta a intensa atividade morfodinâmica em ambientes semiáridos. A área de estudo, apesar de baixa amplitude altimétrica, registra processos erosivos lineares superficiais (sulcos e ravinas) e subsuperficiais (*piping* e voçorocamento).

A análise da conectividade hidrológica nas encostas apresenta forte controle na gênese subsuperficial do voçorocamento, estando diretamente relacionada às características pedológicas. O estudo apenas morfológico (dimensão) é insuficiente para se compreender a dinâmica dos processos erosivos e a gênese das formas, induzindo ao erro de se padronizar formas com sistemas operacionais completamente diferentes numa mesma categoria.

A atividade humana na área promovendo o desmatamento e a construção de estradas, contribuiu diretamente para a ocorrência e intensificação dos processos erosivos lineares superficiais. Estudos futuros devem abordar técnicas de mitigação dos processos erosivos em condições semiáridas.

Contribuição dos autores: Rafael A. Xavier: concepção, metodologia, validação, investigação, curadoria dos dados, redação versão inicial, redação revisão e edição, visualização, supervisão, administração do projeto e aquisição do financiamento. Inocencio de O. Borges Neto: validação, investigação, redação revisão e edição e visualização. Jose João L. L. Souza: análise formal, investigação, recursos, curadoria dos dados, redação revisão e edição e visualização. Philippe V. Cardoso: validação, análise formal, investigação e redação revisão e edição. Jonas O. P. de Souza: análise formal e redação revisão e edição. Bartolomeu I. Souza: investigação, redação revisão e edição.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa de Bartolomeu Israel de Souza, José João Lelis Leal de Souza e Jonas Otaviano Praça de Souza, e pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba.

Agradecimentos: Os autores agradecem aos órgãos de fomento pelo apoio financeiro à pesquisa citados anteriormente, assim como suas respectivas instituições de origem.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALBUQUERQUE, A. W., LOMBARDI NETO, F. & SRINIVASAN, V. S. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um luvissole em Sumé (PB). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 121-128, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100013>
2. ALENCAR, P. H. L. **Medição e modelagem de voçorocas no bioma Caatinga: O caso da bacia representativa de Madalena, CE.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - Universidade Federal do Ceará, 2018, 80p.
3. ALEXANDRE, F. S.; CANDEIAS, A. N. B.; GOMES, D. D. M. Análise das mudanças morfológicas em escala de detalhe em voçoroca urbana utilizando perfilamento a laser e veículo aéreo não tripulado. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 758-769, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p758-769>
4. ANDERSON, R. L.; ROWNTREE, K. M.; LE ROUX, J. J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. **Catena**, v. 206, 105482, p. 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105482>

5. AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - Ano 7, nº 1, p. 09-18, 2006. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v7i1.56>
6. AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. e COE, H.H.G. Distribuição espacial das voçorocas em Gouveia-MG: fatores associados. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.1, N.4, p. 634-647, 2012. Disponível em: <https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/1862>
7. AVNI, Y. Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. **Catena**, v. 63, p. 185-220, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.004>
8. BACCARO, C. A. D. Processos erosivos no domínio do Cerrado. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A.S; BOTELHO, R. G. M. (Org). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 10ª ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, p. 195-227, 2015.
9. BERNATEX-JAKIEL, A.; POESEN, J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 1107-1128, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>
10. BISPO, C. O.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, M. L. G.; SANTOS, A. G.; LISTO, F. L. R.; GIRÃO, O. Diagnóstico de voçorocas na zona periurbana de Garanhuns, Agreste Meridional pernambucano. **Revista de Geografia**, v. 35, n. 2, p. 322-340. 2018. DOI: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2018.234969>
11. BRACKEN, L. J.; CROKE, J., The concept off hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. **Hydrological Processes**, n. 21, p. 1749-1763, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>
12. BRASIL. **Levantamento Exploratório/Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro: SUDENE, 1972, 683p., e anexos.
13. BORRELI, P; ROBINSON, D. A.; FLEISCHER, L. R.; LUGATO, E.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; MEUSBURGER, K.; MODUGNO, S.; SCHÜTT, B.; FERRO, V.; BAGARELLO, V.; OOST, K. V.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature Communications**, v. 8, p. 13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
14. BORGES NETO, I. O. **Processos hidro-erosivos em distintas classes de solo sob diferentes tipos de uso em zona semiárida**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba (PPGG-UFPB), João Pessoa-PB, 2021, 140p.
15. BORGES NETO, I. O.; XAVIER, R. A.; SOUZA, B. I.; SANTOS, L. J. C.; SOARES, D. A.; SOUZA, J. J. L. L. Preliminary experimental data on surface runoff and soil loss in the Caatinga, **Earth Surface Processes and Landforms**, Early View, p. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5581>
16. CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. **Earth-Science Reviews**, v. 106, p. 300-319, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
17. CHAPLOT, V. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. **Geomorphology**, v. 186, p. 1-11, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.031>
18. COELHO NETTO, A. L.; FERNANDES, N. F.; DEUS, C. E. Gullying in southeastern Brazilian Plateau, Bananal, SP. In: **INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES (IAHS)**, 1988, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre(RS), 1988, p. 35-42.
19. COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. da (orgs.) **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p. 93-148.
20. COELHO NETTO, A. L. Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brasil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. **Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria**, Bologna, Itália. V. 3, 1999, p. 21-48.
21. COELHO NETTO, A. L. Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 4, N. 2, p. 118-167, 2003. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v4i2.25>
22. CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A.; CAVALCANTI, L. C. S.; LIRA, D. R. Megamorfologia e morfoestrutura do Planalto de Borborema. *Revista do Instituto Geológico*, v. 31, n. 1-2, p. 35-52. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20100003>
23. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa geológico da província Borborema: projeto geologia e potencial mineral da província Borborema, em escala de 1:1.000.000**. SANTOS, F. G.; PINÉO, T. R. G.; MEDEIROS, V. C.; SANTANA, J. S.; MORAIS, D. M. F.; VALE, J. A. R.; WANDERLEY, A. A. 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22508>
24. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimentos por água subterrânea. Diagnóstico do município de Caraúbas, Estado da Paraíba**. (Org.) MASCARENHAS, J. C.; BELTRÃO, B. A.; SOUZA JUNIOR, L. C.; MORAIS, F.; MENDES, V. A.; e, MIRANDA, J. L. F.

- Recife: CPRM/PRODEEM, 2005a, 10 p., e anexos. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15993/Rel_Cara%C3%BAbas.pdf?sequence=1
25. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimentos por água subterrânea. Diagnóstico do município de Coxixola, Estado da Paraíba.** (Org.) MASCARENHAS, J. C.; BELTRÃO, B. A.; SOUZA JUNIOR, L. C.; MORAIS, F.; MENDES, V. A.; e, MIRANDA, J. L. F. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005b, 10 p., e anexos. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16035/1/Rel_Coxixola.pdf
26. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimentos por água subterrânea. Diagnóstico do município de São João do Cariri, Estado da Paraíba.** (Org.) MASCARENHAS, J. C.; BELTRÃO, B. A.; SOUZA JUNIOR, L. C.; MORAIS, F.; MENDES, V. A.; e, MIRANDA, J. L. F. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005c, 10 p., e anexos. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/16330/1/Rel_S%C3%A3o_Jo%C3%A3o_Cariri.pdf
27. DUNNE, T. Formation and controls of channel networks. **Prog. Phys. Geogr.** 4,211-239, 1980.
28. DUNNE, T. Hydrology, mechanics and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In: **Groundwater Geomorphology**. Ed. C.G., Higgins; D. R., Coates. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 252, 1-28, 1990.
29. FARIAS, A. S.; VIEIRA, A. F. G.; BARBOSA, A. J.; TAVARES, J. S. Análise preliminar do estudo morfométrico das voçorocas na bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM. Anais do VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia, Recife-PE, 2010.
30. FAULKNER, H.; ALEXANDER, R.; TEEUW, R.; ZUKOWSKUJ, P. Variations in soil dispersivity across a gully head displaying shallow sub-surface pipes, and the role of shallow pipes in rill initiation. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 29, p. 1143-1160, 2004.
31. FAULKNER, H.; ALEXANDER, R.; ZUKOWSKY, P. Slopechannel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocata ´n catchment Badlands, Southeast Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, p. 1242-1260, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1610>
32. FITZPATRICK, E. A. **Micromorphology of Soils**. Springer Netherlands, Dordrecht, 1984, 434p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5544-8>
33. FOX, G. A.; CHU-AGOR, M.; WILSON, G. V. Erosion of noncohesive sediment by groundwater seepage: Lysimeter experiments and stability modeling. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 71, n. 6, p. 1822-1830, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0090>
34. FOX, G. A.; WILSON, G. V. The role of subsurface flow in hillslope and streambank erosion: A review of status and research needs. Invited Review, **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 74, n. 3, p. 717-733, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0319>
35. GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. **Recursos hídricos em regiões semiáridas: Estudos e Aplicações**. 1ª ed. Instituto Nacional do Semiárido - Campina Grande, PB e Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2012, 258p.
36. GOUDIE, A. **The encyclopedic Dictionary of Physical Geography**. Basil Blackwell Ltd., Oxford, Inglaterra, 528 p., 1985.
37. GOUDIE, A. **Arid and semi-arid geomorphology**. United States of America, Cambridge University Press, 2013, 454p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794261>
38. GOUVEA, R. L.; CAMPOS, C. C.; MENEZES, J. T.; MOREIRA, G. F. Análise de frequência de precipitação e caracterização de anos secos e chuvosos para a bacia do Rio Itajaí. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 14, Vol. 22, jan/jun, p. 309-323, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55276>
39. GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: **Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos**, Guerra e Cunha (orgs.). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1998, 149-209p.
40. GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Guerra, A. J. T.; Silva, A. S.; Botelho, R. G. M. (orgs.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.
41. GUIHÉNEUF, N.; BOISSON, A.; BOU, R. O.; DEWANDEL, B.; PERRIN, J.; DAUSSE, A.; MARÉCHAL, J. C. Groundwater flow in weathered crystalline rocks: impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. **J. Hydrol.** v. 511, p. 320-334, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.061>
42. IUSS WORKING GROUP WRB. **World Reference Base for Soil Resources**, 4th ed, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. International Union of Soil Sciences, Vienna, 2022.
43. KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Eds.), **Tempo e Clima no Brasil**. Oficina de textos, São Paulo, 2009, p. 213-234.
44. KOCI, J.; SIDLE, R. C.; JARIHANI, B.; CASHMAN, M. J. Linking hydrological connectivity to gully erosion in the catchment of a savanna rangelands tributary which flows to the Great Barrier Reef using structure-from-motion photogrammetry. **Land Degrad Dev.** v. 31, p. 20-36, 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3421>

45. KÜHN, P.; AGUILAR, J.; MIEDEMA, R.; BRONNIKOVA, M. Textural Pedofeatures and Related Horizons, in: **Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths**. Elsevier, 2018, p. 377-423. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00014-0>
46. LEAL, P. J. V.; COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. Desenvolvimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea: bacia do rio do Bananal (RJ/SP). **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 16, n. 1, p. 107-122, 2015. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i1.321>
47. LEE, M.; CHARMAN, J. Soil Erosion. Ch. 11. In: Fookes, P.G., Lee, E. M. & Milligan, G. (Eds.) **Geomorphology for Engineers**. Dunbeath: Whittles Publishing, 2005.
48. LOBATO, F. A. O.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; SANTOS, J. C. N.; LOPES, J. F. B. Perdas de solo e nutrientes em área de Caatinga decorrente de diferentes alturas pluviométricas. **Rev. Agroambiente On-line**, v. 3, p. 65-71, 2009.
49. LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. L. M. P. Performance of Conservation Techniques for Semiarid Environments: Field Observations with Caatinga, Mulch, and Cactus Forage Palma. **Water**, v. 11, n. 4, p. 15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11040792>
50. MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução Espaço-Temporal de Voçorocas no Espírito Santo: Estudo de Caso nos Municípios de Afonso Cláudio. **Rev. Bras. Geomorfol.** (Online), São Paulo, v. 17, n. 1, (Jan-Mar), 2016, p. 191-204. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i1.712>
51. MEIRA, S. A.; SILVA, E. V. Índice de geodiversidade do parque nacional de Ubajara, Ceará, Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 2, p. 35-40, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID20534>
52. MÜCHER, H., VAN STEIJN, H., KWAAD, F. Colluvial and Mass Wasting Deposits, in: **Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths**. Elsevier, p. 21-36, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00002-4>
53. NSSH. National Soil Survey Handbook. Washington, DC: Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture, 2008.
54. NYSSSEN, J.; POESEN, J.; VEYRET-PICOT, M.; MOEYERSONS, J.; MITIKU HAILE.; DECKERS, J. Soil Science Society of America. **Glossary of soil science Terms**. Soil Science Society of American Landform, v. 31, p. 167-185, 2007.
55. OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Guerra, A. J. T.; Silva, A. S.; Botelho, R. G. M. (orgs.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.
56. OLIVEIRA, L. B.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Micromorfologia e Gênese de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semi-árido brasileiro. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, v. 32, p. 2407-2423, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600019>
57. OLIVEIRA, L. B., FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Morphology and classification of Luvisols and Planosols developed on metamorphic rocks in Semiarid northeastern Brazil. **Rev. Bras. Cienc. do Solo**, v. 33, p. 1333-1345, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832009000500026>
58. PICHLER, E. "Boçorocas". **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 2, n. 1, p. 3-16, 1953.
59. PINTO, B. L.; ARAÚJO, H. M. Comportamento geomorfológico de voçoroca no município de Tucano – semiárido baiano. **Revista de Geografia** (Recife) V. 37, N. 2, p. 385-404, 2020a.
60. PINTO, B. L.; ARAÚJO, H. M. Configuração geomorfológica contemporânea de uma voçoroca sobre a litoestrutura sedimentar da sub-bacia de tucano central – BA. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 14, n. 35, mai./ago. p. 1-26, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v14i35.6072>
61. PODWOJEWSKI, P.; JANEAU, J. L.; CAQUINEAU, S.; HUGHES, J. Mechanisms of lateral and linear extension of gullies (dongas) in a subhumid grassland of South Africa. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 45, n. 13, p. 3202-3215, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4960>
62. POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. **Catena**, v. 50 n. (2-4), p. 91-133, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
63. PRADO, D. E. Seasonally dry forests of tropical South America: From forgotten ecosystems to a new phytogeographic unit. **Edinburgh Journal of botany**. v. 57, p. 437-461, 2000. DOI: 10.1017/S096042860000041X
64. ROCHA-LEÃO, O. M. da. Potencialidades e limitações da revegetação para o controle de voçorocamento em formações quaternárias. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFRJ, 2005.
65. RUBEY, W. W. Gullies in the Great Plains formed by sinking of the ground. **American Journal of Science**. v. 15, p. 417-422, 1928. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.s5-15.89.417>
66. SALLEH, K. O. E MOUSAZADEH, F. Gully erosion in semiarid regions. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 19, p. 655-661, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.182>

67. SALOMÃO, F. X. T. Controle e Prevenção de Processos Erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A.S; BOTELHO, R. G. M. (Org). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 10ª ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2015, p. 229-268.
68. SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; RIBEIRO FILHO, J. C. Erosive process control in the brazilian semiarid region. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 3, p. 695-703, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n319rc>
69. SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. **OKARA: Geografia em debate**, v. 1, n. 1, p. 16-32, 2007.
70. SANTOS, H. G. S.; JACOMINE, P. K.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Embrapa, 2018, 356p.
71. SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; GUERREIRO, M. J. S.; MEDEIROS, P. H. A.; QUEIROZ PALÁCIO, H. A.; ARAÚJO NETO, J. R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **J. Hydrol.** v. 541, p. 1057-1066, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.016>
72. SANTOS, R. M.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; EISENLOHR, P. V.; QUEIROZ, L. P.; CARDOSO, D. B.; RODAL, M. J. Identity and relationships of the Arboreal Caatinga among other floristic units of seasonally dry tropical forests (SDTFs) of north-eastern and Central Brazil. **Ecol Evol.** v. 2, n. 2, p. 409-428, 2012. DOI: 10.1002/ece3.91.
73. SIDLE, R. C., JARIHANI, B., KAKA, S. I., KOCI, J., & AL-SHAIBANI, A. Hydrogeomorphic processes affecting dryland gully erosion: Implications for modelling. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 43, n. 1, p. 46-64, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133318819403>
74. SILVA, A. S. Análise Morfológica dos Solos e Erosão. In: **Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações**. (Orgs.) GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, G. R. M. 3ª Ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2007, p. 101-126.
75. SILVA, B. A.; GOMES, A. J. de L.; GOMES, J. L. de S. Erosão hídrica e antropogênica na formação de voçorocas na cidade de Teófilo Otoni. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, e49711932312, p. 1-17, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32312>
76. SILVA, J. M. C. da; BARBOSA, L. C. F.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. The Caatinga: Understanding the Challenges. In: **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Springer International Publishing, 2017; p. 3-19.
77. SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: **Fertilidade do Solo**. NOVAIS et. al. (eds). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG, 2007. p. 275-374.
78. SONNEVELD, M. P. W.; EVERSON, T. M.; VELDKAMP, A. Multi-scale analysis of soil erosion dynamics in KwaZulu-Natal, South Africa. **Land Degradation and Development**, v. 16, p. 287-301, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.653>
79. SOUZA, B. I.; SILANS, A. M. B. P.; SANTOS, J. B. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n. 2-3, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000200019>
80. SOUZA, B. I.; MENEZES, R.; ARTIGAS, R. C. Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil. **Investigaciones Geográficas - Instituto de Geografía**. Universidad Nacional Autónoma de México, v. 1, p. 45-59, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.44092>
81. SOUZA, B. I.; SOUZA, R. S. Processo de ocupação dos Cariris Velhos – PB e efeitos na cobertura vegetal: contribuição à Biogeografia Cultural do semiárido. **Caderno de Geografia**, v. 26, número especial 2, p. 229-258, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p229>
82. SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. Desertificação e seus efeitos na vegetação e solos do Cariri Paraibano. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**, ano 08, n. 16, p. 217-232, 2009. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/250>
83. SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; QUEIROZ, R. T.; SUERTEGARAY, D. M. A.; VIANNA, P.; SOUZA, J. J. L. L. Atividade de campo, paisagem e interdisciplinaridade, na Chapada do Arapipe, Semiárido Brasileiro. In: (Coord.) JACINTO, R. **AS Novas Geografias dos Países de Língua Portuguesa: Cooperação e Desenvolvimento**. 1ª ed. Lisboa, Editora Âncora, 2020, p. 51-75.
84. SOUZA, J., HOOKE, J. Influence of seasonal vegetation dynamics on hydrological connectivity in tropical drylands. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 11, e14427, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14427>
85. STOOPS, G. **Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections**. 2ª ed. Wiley-Blackwell, Hoboken, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2136/guidelinesforanalysis2>
86. TEBEBU, T. Y.; ABIY, A. Z.; ZEGEYE, A. D.; DAHLKE, H. E.; EASTON, Z. M.; TILAHUN, S. A.; COLLICK, A.S.; KIDNAU, S.; MOGES, S.; DADGARI, F.; STEENHUIS, T. S. Surface and subsurface flow effect on permanent gully formation and

- upland erosion near Lake Tana in the northern highlands of Ethiopia. **Hydrol. Earth Sys. Sci.** v. 14, p. 2207-2217, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-14-2207-2010>
87. TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª Edição revista e ampliada. Embrapa: Brasília-DF, 2017, 574p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>
88. TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. John Wiley e Sons, New York, 1943, 510p. DOI: 10.1002/9780470172766
89. THWAITES, R.; BROOKS, A. A gully is not a stream channel. How do we tell the difference and why does it matter? Full paper 74446, 10th Australian Stream Management Conference 2021. Kingscliff, NSW. 2–4 August 2021.
90. THWAITES, R. N.; BROOKS, A. P.; PIETSCH, T. J.; SPENCER, J. R. What type of gully is that? The need for a classification of gullies. **Earth Surf Process Landforms**. v. 47, p. 109-128, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5291>
91. TORRI, D.; BORSELLI, L. Water erosion. In: Sumner, M.E. (Ed.) **Handbook of Soil Science**. Washington, DC: CRC Press, 2000.
92. VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: impacts, factors and controls. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
93. VIEIRA, A, F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. (Tese de Doutorado). Florianópolis: UFSC/PPGG, 2008, 223p.
94. XAVIER, R. A. Processos Geomorfológicos e Evolução da Paisagem no Semiárido Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 1, p. 59-69, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n1ID20692>
95. XAVIER, R. A.; SANTOS, I. M.; DAMASCENO, J.; DORNELLAS, P. C.; BORGES NETO, I. O. Processos erosivos superficiais no município de Juazeirinho, Região Semiárida da Paraíba. **Revista do REGNE**, v. 2, Número Especial: III Simpósio de Geografia Física do Nordeste – Caicó-RN, p. 113-122, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2016v2n0ID10465>
96. WADI, D.; WU, W.; MALIK, I.; FAUD, A.; THAW, M. M. Assessment and feasibility of the potential artificial groundwater recharge in semi-arid crystalline rocks context, Biteira district, Sudan. **Scientific African**, v. 17, e01298, p. 14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01298>
97. WILSON, G.V.; WELLS, R.R.; KUHNLE, R.A.; FOX, G.A.; NIEBER, J. Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes. **Earth Surface Processes Landforms**, v. 43, p. 45-63, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.4147>
98. ZECH, W., SCHAD, P., Hintermaier-Erhard, G., 2022. Subtropics with Year-Round Rain, in: *Soils of the World*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 113–129. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30461-6_7
99. ZEGEYE, A. D.; LANGENDOEN, E. J.; STOOF, C. R.; TILAHUN, S, A.; DAGNEW, D. C.; ZIMALE, F. A.; GUZMAN, C. D.; YITAFERU, B.; STEENHUIS, T. S. Morphological dynamics of gully systems in the subhumid Ethiopian Highlands: the Debre Mawi watershed. **Soil**, v. 2, p. 1-16, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2-443-2016>



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.