

ANÁLISE MULTIVARIADA DA VOÇOROCA URBANA LOCALIZADA NA PORÇÃO SUL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO RIO PARNAÍBA

*MULTIVARIARY ANALYSIS OF URBAN GULLY LOCATED IN THE SOUTH PART
OF THE LOW PARNAÍBA RIVER HYDROGRAPHIC BASIN*

*ANÁLISIS MULTIVARIAL DE LA URBANA VOÇOROCA UBICADA EN LA PORCIÓN
SUR DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA BAJA DEL RÍO PARNAÍBA.*

WELLYNNE CARLA DE SOUSA BARBOSA¹
IRACILDE MARIA DE MOURA FÉ LIMA²
ANTONIO JOSÉ TEIXEIRA GUERRA³

¹Doutoranda em Geografia do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e Pesquisadora Associada do LAGESOLOS.

Email: wellynnekarla@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5885-1631>

²Professora Dr.^a no Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Piauí.

Email: iracildemourafelima@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-7180>

³ Professor Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e Coordenador do LAGESOLOS

Email: antoniotguerra@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2562-316X>

Recebido 30/11/2021

Enviado para correção 09/12/2021

Aceito 15/12/2021

RESUMO

O processo de erosão atua naturalmente sobre os solos e rochas modificam o relevo, sendo os solos um fator que influencia sua ocorrência e intensidade. A prevenção e recuperação desses eventos demandam recursos e planejamentos que considerem as especificidades do meio físico, além de condições sociais do desenvolvimento urbano. Nesse sentido, este estudo visa fazer uma análise espaço-temporal associada a parâmetros físicos do solo da voçoroca localizada na porção sul da bacia hidrográfica do baixo rio Parnaíba, na área urbana do município de Miguel Alves, Estado do Piauí, desenvolvida em sedimentos da Formação Piauí. Para tanto, foram utilizadas imagens de satélite dos anos de 2007 e 2017. Coletaram-se amostras de solo nos taludes das feições erosivas, procedendo-se a ensaios laboratoriais (densidade e porosidade), além de ensaios de campo (registros fotográficos, reconhecimento da área e coleta de amostras). As análises de laboratório seguiram os métodos de Teixeira *et al.* (2017). Com a realização do trabalho percebeu-se um crescimento do processo de voçorocamento no período estudado, aumentando sua área de abrangência em (21,85%), numa escala de análise mais detalhada relacionada aos aspectos físicos do solo, tendo se observado que suas características demonstram grande susceptibilidade a processos erosivos, o que contribuiu, junto as influências antrópicas, para a aceleração da erosão na área.

Palavras-chave: Voçoroca. Erosão dos solos. Monitoramento.

ABSTRACT

The erosion process acts naturally on soils and rocks modifying the relief, and the soils are a factor that influences its occurrence and intensity. The prevention and recovery of these events require resources and planning that consider the specifics of the physical environment, in addition to the social conditions of urban development. In this sense, this study aims to make a spatiotemporal analysis associated with physical parameters of the soil of the gully located in the southern portion of the lower Parnaíba river watershed, in area of the municipality of Miguel Alves, state of Piauí, developed in sediments from the Piauí Formation. For this purpose, satellite images from the years 2007 and 2017 were used. Soil samples were collected on the slopes of the erosive features, carrying out laboratory tests (density and porosity), in addition to field tests (photographic records, recognition of the area and sample collection). The laboratory analyzes followed the methods of Teixeira *et al.* (2017). With the completion of the work, it was noticed an increase in the gully process in the period studied, increasing its coverage area by (21.85%), in a more detailed analysis scale related to the physical aspects of the soil, it is observed that its characteristics demonstrate great susceptibility to erosion processes, which contributed, along with anthropogenic influences, to accelerate erosion in the area.

Palavras-chave: Gully. Soil erosion. Monitoring.

RESUMEN

El proceso de erosión actúa de forma natural sobre suelos y rocas, modificando el relieve, siendo los suelos un factor que influye en su ocurrencia e intensidad. La prevención y recuperación de estos eventos requieren recursos y planificación que consideren las especificidades del entorno físico, además de las condiciones sociales del desarrollo urbano. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis espacio-temporal asociado a parámetros físicos del suelo de la erosión ubicada en la porción sur de la cuenca baja del río Parnaíba, ubicada en el área urbana del municipio de Miguel Alves, estado de Piauí, desarrollado en sedimentos de la Formación Piauí. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales de los años 2007 y 2017. Se recolectaron muestras de suelo en las laderas de los rasgos erosivos, realizando pruebas de laboratorio (densidad y porosidad), además de pruebas de campo (registros fotográficos, reconocimiento del área y recolección de muestras). Los análisis de laboratorio siguieron los métodos de Teixeira *et al.* (2017). Con la finalización de la obra, se notó un incremento en el proceso de barrancos en el período estudiado, aumentando su área de cobertura en (21,85%), en una escala de análisis más detallada relacionada con los aspectos físicos del suelo, se observa que sus características demuestran una gran susceptibilidad a los procesos de erosión, lo que contribuyó, junto con las influencias antropogénicas, a acelerar la erosión en la zona.

Palavras-chave: Erosión. La erosión del suelo. Vigilancia.

INTRODUÇÃO

As interações que envolvem os processos geomorfológicos são uma constante na paisagem geográfica, isso é perceptível nas diferentes escalas de análise, como a espaço-temporal, onde é possível identificar e analisar diferentes feições erosivas, como ravinas e voçorocas ao longo do tempo. Esse tipo de feição, segundo Oliveira (2012) resulta da tendência do sistema ambiental em buscar o estado de equilíbrio natural entre a energia disponível e a eficiência do sistema em distribuir ou dissipar esta energia.

A erosão tem acontecido de forma acelerada de maneira que a natureza tem cada vez menos condições de se recompor com a retirada da cobertura vegetal, principal agente de proteção do solo, se intensificando os processos erosivos (GUERRA, 2005; MOHAMMED *et al.*, 2020; SPALEVIC *et al.*, 2020).

O uso inadequado dos recursos naturais disponíveis ao homem, com destaque ao uso e cobertura do solo, tem ocasionado desequilíbrio ao meio ambiente. Esses processos apesar de ocorrerem de forma natural no espaço geográfico, podem ser intensificados pela ação do homem podendo se apresentar em diferentes escalas, causando desequilíbrios que podem ser irreversíveis nos sistemas ambientais (DE MELO *et al.* 2020; CÓRDULA *et al.* 2018; MARCHIORO *et al.*, 2014).

Das diferentes feições erosivas existentes as voçorocas se constituem na mais severa feição, sobretudo por serem de grande porte, podem ser destrutivas ao solo, trazerem maiores prejuízos, além de ter sua recuperação lenta, com altos custos e de difícil controle, necessitando de monitoramento até sua completa estabilização (LOUREIRO *et al.*, 2020; MORGAN, 2005).

Os solos possuem condições naturais para atuação dos processos erosivos, estando relacionadas às interações de um conjunto de fatores naturais que os modelam, porém, a atuação da sociedade pode alterar essas condições naturais, tanto de forma positiva: quando retarda a evolução de uma erosão com técnicas adequadas, ou de forma negativa: quando provoca ou acelera feições erosivas. Logo, o uso e manejo do solo, assim como a retirada da cobertura vegetal, constituem ações no início de determinada erosão, pois quanto mais exposto o solo fica, maior será a probabilidade da ocorrência do transporte de materiais por enxurradas, aguaceiros e chuvas. (BARBOSA; MAIA, 2020; VANMAERCCKE *et al.*, 2021; MOHAMMED *et al.*, 2020).

Segundo Rodriguez (2000) in Silveira & Mendonça (2009), as voçorocas são fenômenos naturais de gênese e evolução complexa, devido aos diversos fluxos e tipos de movimentos de massas que podem atuar isolada ou conjuntamente na sua formação e evolução.

A erosão de voçorocas pode ser vista como um sinal de grave degradação do solo, por isso tem recebido cada vez mais atenção por parte de pesquisadores e, em alguns casos, do poder público. Portanto, estudos que trabalham a qualidade do solo e sua degradação a partir

da análise da erosão são importantes e têm sido cada vez mais frequentes (LOUREIRO *et al.*, 2020; MOHAMMED *et al.*, 2020; SPALEVIC *et al.*, 2020; LI MAOJUAN *et al.*, 2021; KIEFER *et al.*, 2021; VANMAERCKE, 2021).

Diante da relevância nos estudos das voçorocas verifica-se uma diversidade de métodos e técnicas de análises, que vão desde os convencionais monitoramentos por estacas erosivas e análises de imagens de satélite ao mais recentemente, monitoramentos por VANT'S (veículo aéreo não tripulado), uso de estação total, além das análises laboratoriais, que permitem a verificação de parâmetros físicos sobre a qualidade do solo, podendo dar suporte e complementação às demais análises. (GUERRA, 2005; VRIELING *et al.*, 2007; GUERRA *et al.*, 2020; LOUREIRO *et al.*, 2020; FROTA FILHO; VIEIRA, 2020)

Um dos primeiros autores a tratar do papel das ravinas e voçorocas no processo geomorfológico foi Horton em 1945, destacando a função dos condutores de água e sedimentos, assim como os embriões de um sistema de drenagem. A partir do exposto, é possível observar a importância dos estudos relacionados a evolução e desenvolvimento desse tipo de processo erosivo.

É nesse contexto que o presente estudo objetiva analisar a evolução espaço-temporal da voçoroca urbana localizada no município de Miguel Alves, Piauí, na bacia hidrográfica do baixo rio Parnaíba-PI, entre os anos de 2007 e 2017, correlacionando com os parâmetros físicos (densidade e porosidade) atuais do solo da área estudada.

VOÇOROCA E AS QUESTÕES CONCEITUAIS-METODOLÓGICAS

Analisar feições erosivas do tipo voçoroca requer bastante atenção conceitual, pois alguns autores divergem em suas interpretações, sobretudo em termos dimensionais. Imeson e Kwaad (1980) relatam que voçorocas são feições erosivas com profundidade e largura superiores a 100cm, diferenciando assim da dimensão apresentada pela SSSA (*Soil Science Society of America*).

Já Foster (1982) e Bergsma *et al.* (1996) diferenciaram ravina e voçoroca pela profundidade e largura, situando a voçoroca como uma feição superior a 30cm de largura e profundidade. A conceituação utilizada pela *Soil Science Society of America* (SSSA), adotada por um conjunto de estudos desenvolvidos no Brasil, determina o termo voçoroca como um canal resultante de erosão proveniente de fluxos de água concentrados, intermitentes e relacionados com a água da chuva, podendo esse tipo de processo erosivo interferir em processos normais de cultivo apresentando profundidade e largura superior a 50cm.

De acordo com Oliveira (2012) a maior aceitação entre os pesquisadores nacionais brasileiros é a padronização com a literatura internacional, o que facilita a comunicação e interação entre as partes, optando-se assim por classificar voçorocas como feição erosiva com largura e profundidade superiores a 50 cm.

O que se observa é de fato uma dificuldade em estabelecer critérios dimensionais rígidos de diferenciação entre ravinas e voçorocas, de acordo com Poesen *et al.* (2003), a voçoroca é uma feição com uma área mínima de 1m², não estabelecendo largura e profundidade mínima.

Segundo Oliveira (2012), diferentes escalas, tais como espaciais e temporais, podem influenciar de diferentes formas a erosão por voçoroca, essas influências podem ser causadas por vários mecanismos, podendo ser entendidas por: deslocamentos de partículas, transporte por escoamento superficial difuso, transporte por fluxos concentrados, erosão por quedas d'água, solapamentos, liquefação, movimentos de massa e arraste de partículas.

De acordo com Bezerra *et al.* (2012) a dinâmica interna da água no solo também é um importante parâmetro para o entendimento dos processos erosivos em feições do tipo voçorocas, pois ela pode revelar a relação de diversos fatores que controlam o componente

hídrico, como o clima, propriedades físicas do solo, tensão, sistema radicular da vegetação, macro e micro fauna e uso do solo, influenciando a umidade do solo que está diretamente ligado ao seu potencial matricial, quanto mais úmido o solo, maior será o seu potencial.

Com o potencial matricial pode-se também determinar o grau de saturação da água no solo. Quanto maior a saturação, menor será a capacidade da água em se infiltrar e mais rápida será a geração do escoamento superficial. (BEZERRA *et al.*, 2012)

No contexto da dinâmica de voçorocas é importante entender também o papel dos sedimentos provindos da erosão em espaços temporais de limites variáveis, segundo Ramalho e Guerra (2014) estudar essa relação é relevante por envolver a prática da coleta de amostras em áreas do relevo, onde interagem processos e mecanismos naturais e antrópicos, visando a avaliar a relação entre erosão e deposição.

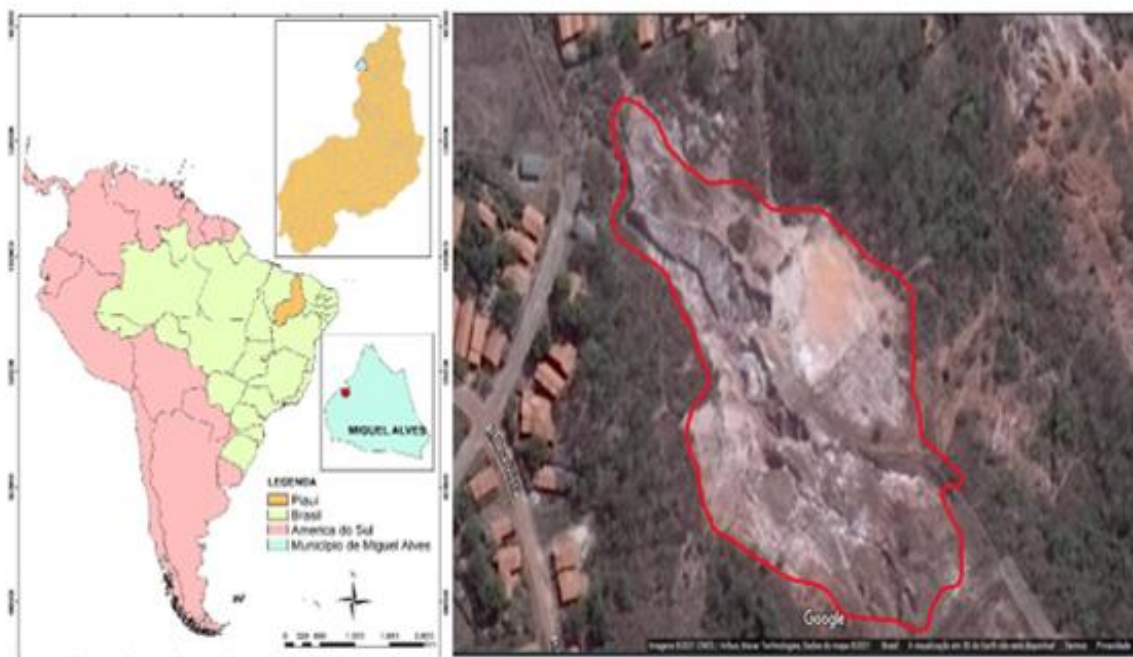
ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada na zona urbana do município de Miguel Alves, no estado do Piauí, Brasil. O município fica a 04°09'56'' de latitude sul e 42°53'43'' de longitude oeste, localizado na microrregião do Baixo Parnaíba Piauiense, com uma área total de 1.393 km² (CEPRO, 2001). A identificação desse tipo de incisão no solo nesta localidade de fácil acesso estimulou o interesse do estudo, no intuito de compreender as possíveis consequências da ocorrência desta voçoroca e estudar a sua evolução no espaço e no tempo.

É uma área de clima tropical subúmido, com duração do período seco de seis meses e temperaturas médias entre 22°C a 37°C e precipitação pluviométrica média anual de 1.668,4 mm (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2004). Sua vegetação é composta por floresta decidual secundária mista, caatinga/cerrado e cerrado floresta. O município tem um significativo sistema hídrico dentre os quais estão: Rio Parnaíba, lagoas do Riachão, da Salina e das Almas e os riachos da Arara e da Ameixa. A Figura 1 mostra a localização do município, sendo que no contexto do Estado do Piauí este município se encontra na área das Bacias Difusas do Baixo Parnaíba.

A voçoroca em análise está situada na margem de um pequeno riacho afluente do rio Parnaíba, na área urbana de Miguel Alves. Tem sua base geológica na Formação Piauí, que é datada do Carbonífero sendo composta por arenitos finos a grossos, cinza-esbranquiçados a avermelhados, eventualmente conglomeráticos; folhelhos vermelhos; e calcários esbranquiçados (GÓES & FEIJÓ, 1994). O solo predominante na região é o Argissolo vermelho-amarelo distrófico típico argiloso e muito argiloso (EMBRAPA, 2018).

Figura 1 - Mapa de localização da voçoroca.



Fonte: Organizado por Barbosa (2021). Base de dados: IBGE (2017). Imagem: Google Earth (2021).

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, foram utilizados levantamentos bibliográficos para a compreensão de causa e efeito dos processos erosivos. Buscou-se também conhecer os trabalhos já realizados sobre o tema em estudo, tanto nacionais quanto internacionais, no sentido de oferecer base teórica para o desenvolvimento deste estudo.

O trabalho de campo foi realizado em fevereiro de 2021, quando foi feito o reconhecimento da área, registros fotográficos e coletas de amostras de solos. Foram coletadas amostras do horizonte A da voçoroca e do horizonte B, correspondente ao talude da área interna da feição erosiva.

A etapa seguinte correspondeu às análises de laboratório, que seguiu o manual da EMBRAPA organizado por Teixeira *et al.* (2017), para análise de porosidade e densidade do solo. O método de determinação e análise da densidade do solo objetiva mensurar a densidade média de um volume conhecido de solo, estando a densidade relacionada com a porosidade total e com a composição orgânica e mineralógica média do solo. Este estudo, juntamente com os resultados da densidade de partículas, permitiram o cálculo da porosidade do solo (TEIXEIRA *et al.*, 2017)

Para a elaboração do mapa de evolução espaço-temporal da voçoroca, foram utilizadas imagens de satélite obtidas a partir do *software Google Earth*, dos anos de 2007 e 2017, imagens estas que foram ortoretificadas com resolução que varia de 30m (2007) e 15m (2017).

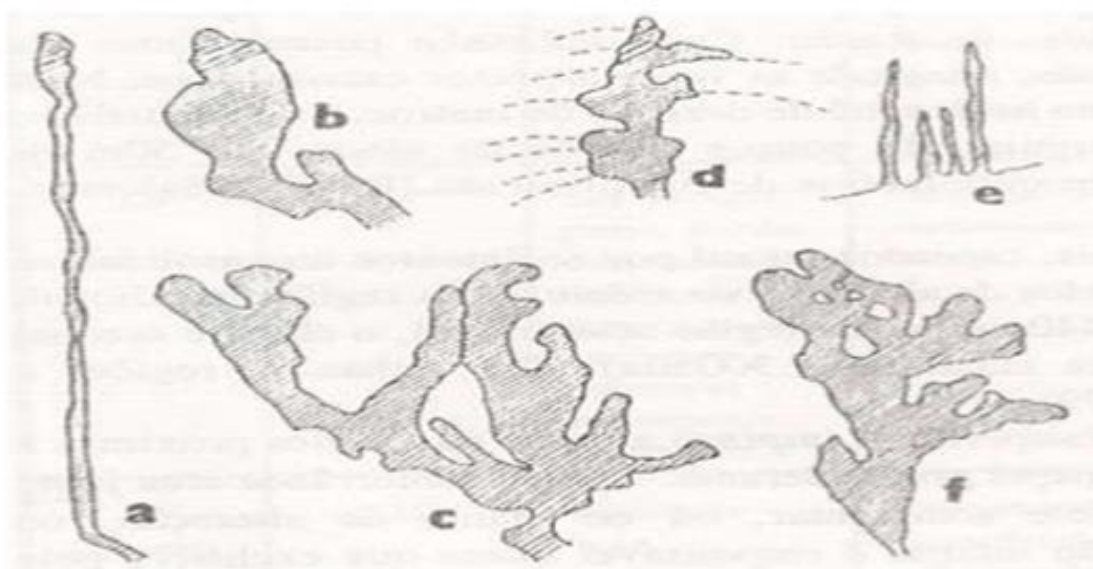
A identificação e vetorização do limite da voçoroca nos anos estudados foi feita através da técnica de fotointerpretação, que consiste em examinar as imagens dos objetos na fotografia e deduzir sua significação. Neste caso, os contornos da voçoroca foram identificados nas diferentes imagens dos anos de 2007 e 2017, possibilitando gerar planos de informação cartográfica (shapes), sendo os valores da área em metros quadrados obtidos a partir da ferramenta *calculate geometry*, este dado foi adquirido a partir da comparação das imagens de satélite dos anos de 2007 e 2017.

A análise foi feita a partir do *software ArcGis 10.3*, disponível no Laboratório de Geomorfologia Ambiental e Degradação dos solos – LAGESOLOS do departamento de geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e o gráfico foi elaborado no *software Excel* versão 2016.

O sistema de projeção adotado foi a Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 23 Sul, com parâmetros de DATUM referentes ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS).

A classificação da voçoroca foi feita a partir da proposta de Ireland et al. (1939), que se baseia na morfologia, e identifica os seguintes tipos: a) linear; b) bulbiforme; c) dendrítica; d) em treliça; e) paralela; f) composta (Figura 2).

Figura 2 - Classificação morfológica das voçorocas.



Fonte: Ireland *et al.*, (1939).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estima-se que a voçoroca de Miguel Alves tenha iniciado os processos erosivos na década de 1990, com base em informações locais. Entretanto, a presente análise considerou o período de 2007 a 2017 para estimar sua evolução no tempo e no espaço.

A partir da análise comparativa das imagens de satélite de 2007 e de 2017, observou-se que no ano de 2007, esta voçoroca apresentava uma área de aproximadamente 1.985 m², tendo sua dimensão em 2017 aumentada para 2.765 m², indicando que sua área teve rápida expansão pela intensificação da ação erosiva ao longo destes dez anos.

Assim, o desenvolvimento da erosão na voçoroca estudada, sobretudo na sua cabeceira, se agravou com o passar dos anos com um aumento de cerca de 780 m², ou seja, de 21,85% no período referido. Este significativo aumento da dimensão da voçoroca urbana em um período tão curto certamente se encontra diretamente relacionado ao crescimento da cidade de Miguel Alves em direção ao morro onde a voçoroca se localiza, pois se observa um aumento recente do número de residências e um constante fluxo dos moradores no entorno da voçoroca (Figura 3).

Figura 3 - Pannel de imagens mostrando a evolução da voçoroca e urbanização no seu entorno, em Miguel Alves, entre 2007 e 2017.



Fonte: Imagens Google Earth (2007 e 2017). Organizado por Barbosa (2021). (A) Voçoroca em 2007; (B) Voçoroca em 2017.

Esse aumento no fluxo de pessoas principalmente na área do desmatamento da encosta voltada para a Rua Maria Celeste, também pode estar relacionado ao acesso e instalação de antenas de telecomunicação no topo do morro, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Voçoroca em relação às torres de telecomunicação.

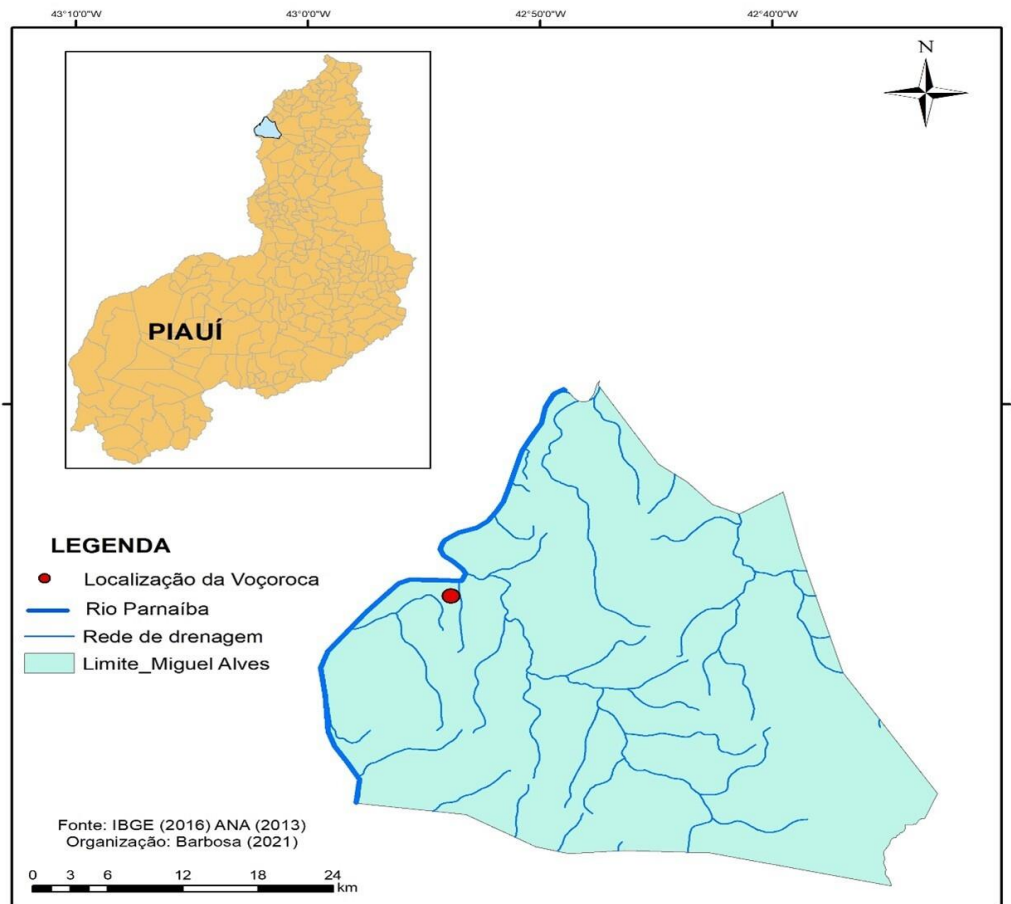


Fonte: Imagem Google Earth (2021); Barbosa (2021). (A) Localização da voçoroca. (B) Vista das torres de telecomunicação a partir da voçoroca em estudo.

Dessa forma, o aumento da urbanização poderá gerar outros problemas que podem influenciar no crescimento da voçoroca, como o direcionamento das águas pluviais pelo sistema de drenagem urbano. (ADEDIJI; JEJE; IBITOYE, 2013).

Outro fator que tem contribuído para o desenvolvimento desta voçoroca é sua localização geográfica em relação à rede de drenagem da região, que fica próxima à margem do rio Parnaíba, numa encosta íngreme drenada por um pequeno riacho que corta rochas friáveis e solos delgados expostos também à erosão pluvial (Figura 5).

Figura 5 - Rede de drenagem do município de Miguel Alves – PI.



Fonte: Organizado pela autora (2021)

Segundo Bandeira (2005) a erosão marginal destrói as margens de um rio, tendo grande influência no aumento da largura do canal, contribuindo para o aumento da carga no fundo, desvalorizando terrenos ribeirinho e limitando seu uso adequado. Segundo Guerra *et al.* (2017) a gestão integrada de bacias de drenagem oferece um caminho promissor na conservação eficaz do solo, tornando-se importante o conhecimento da rede de drenagem próxima à pontos de erosão. Como observado na Figura 5 a localização da voçoroca está entre dois riachos afluentes do rio Parnaíba e bem próxima à margem do rio Parnaíba, o principal do estado que forma o nível de base regional (LIMA; AUGUSTIN, 2010).

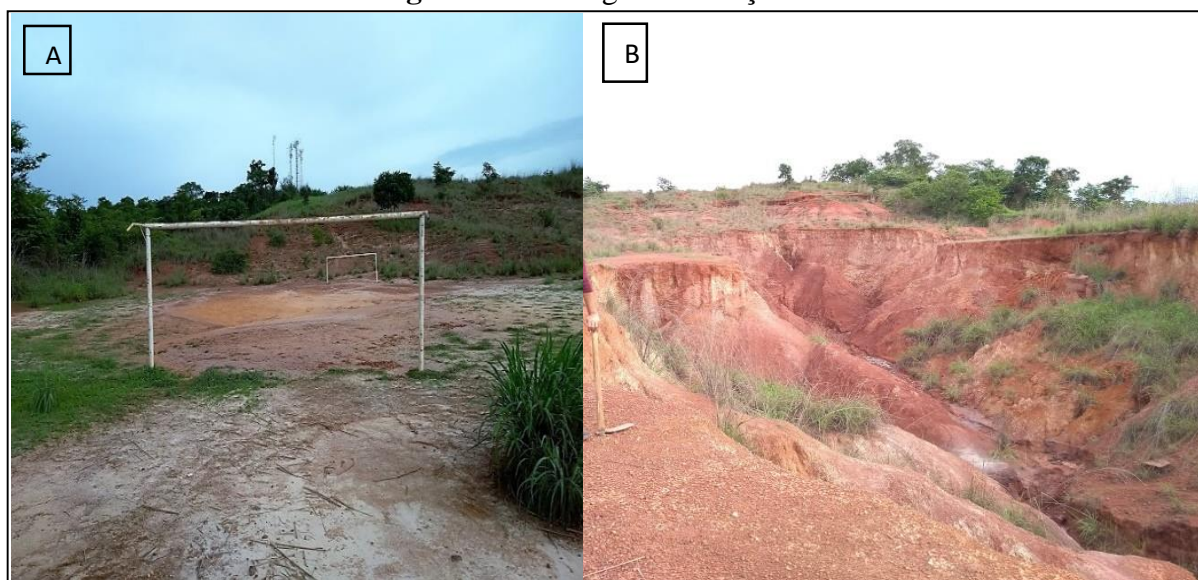
Observa-se, ainda, que o divisor topográfico destes dois riachos corresponde a um morro que apresenta encostas íngremes, tendo a voçoroca se instalado nas encostas voltadas para o norte, enquanto as encostas voltadas para o nordeste apresentam-se com cobertura vegetal razoavelmente conservada e o arruamento na sua base (Figura 3).

Segundo Adediji *et al.* (2013) o processo acelerado de erosão pode estar associado também ao crescimento populacional da área urbana e as atividades relacionadas ao uso do solo na área além da intensidade elevada da pluviosidade. Na análise de campo foi possível perceber que na margem esquerda da voçoroca ocorre um fluxo constante da população local, a qual é utilizada para atividades de lazer em um campo de futebol improvisado, como se observa na Figura 6.

Tendo em vista que os processos erosivos podem ser intensificados pelas atividades humana, se torna cada vez mais necessário a conscientização da população local quanto à conservação do solo, processo este que busca evitar ou atenuar os processos erosivos. O uso e o manejo inadequado da terra expõem o solo ao sol, chuvas, ventos e a outros agentes de intemperismo físico que afetam a qualidade e resistência do solo (SÁ; ROCHA FILHO, 2020).

A erosão é originada sobretudo pela ação da água e do vento, tornando-se um dos principais fatores de enfraquecimento dos solos, ela ocorre ao longo de milhares de anos e é um dos principais fatores de modificação das paisagens.

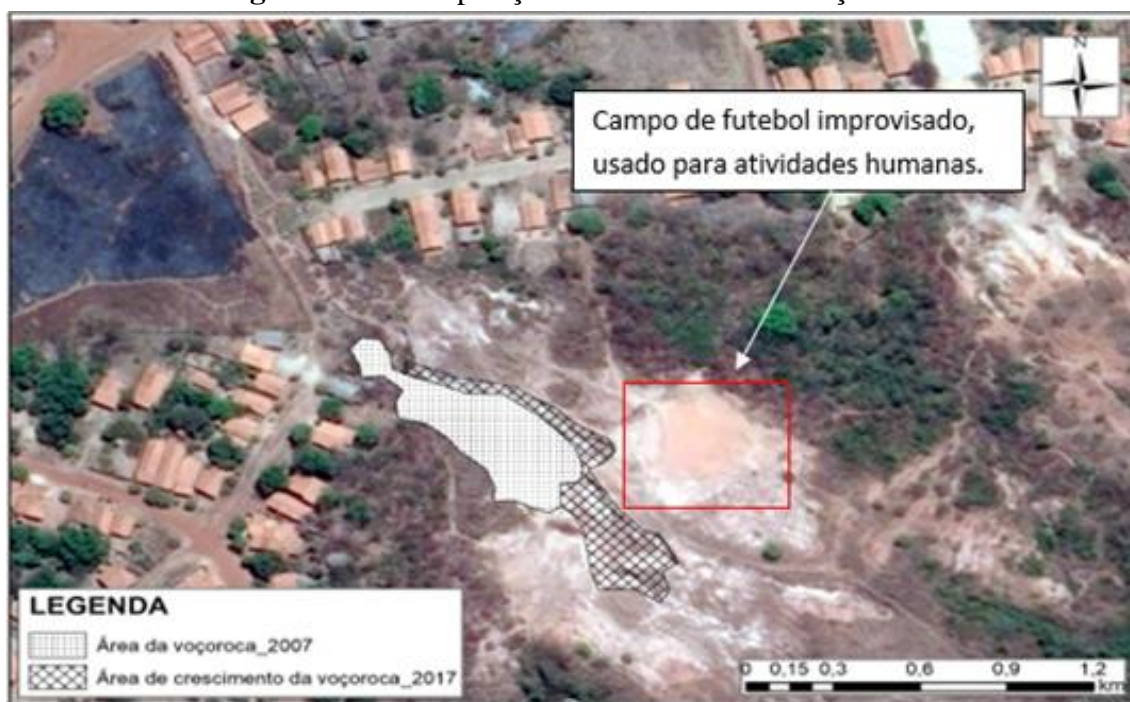
Figura 6 – Vista geral da voçoroca.



Fonte: Barbosa (2021). (A) Campo de futebol usado para atividades humanas de lazer na margem esquerda da voçoroca, (B) visão geral da voçoroca.

No ano de 2007 a voçoroca apresentava um formato tipo bulbiforme, indicando o início da expansão erosiva em seu interior, em 2017 ela apresenta um formato aparentemente dendrítico, com vários filetes ou arestas, associados à intensificação do processo erosivo na sua parte interna, contribuindo assim para sua expansão lateral. Na Figura 7 é possível observar a área e a posição da expansão desta voçoroca de Miguel Alves em 2017, em relação ao ano de 2007, um crescimento que corresponde a aproximadamente 21,85%, notadamente nas suas cabeceiras e lado direito, ampliando assim sua extensão e largura.

Figura 7 - Área e posição de crescimento da voçoroca.



Fonte: Imagem Google Earth (2017). Organizado pela autora (2021).

Foi possível observar também a ausência de práticas conservacionistas do solo e de cobertura vegetal arbórea na margem esquerda da voçoroca, o que se intensificou a partir do seu uso para atividades humanas. Esse fator conjuntamente com o surgimento de águas subsuperficiais intensificaram a erosão lateral.

A existência de cobertura vegetal arbórea com regenerações em parte da margem direita da voçoroca (média e baixa encosta) favoreceu para estabilidade do solo, em situação oposta ao ocorrido na margem esquerda, onde é possível observar o solo exposto e mais compactado devido a maior circulação de pessoas que se deslocam para prática de atividades no campo de futebol improvisado.

Parâmetros físicos dos solos da voçoroca em estudo

Os parâmetros de densidade do solo, de partícula e porosidade na voçoroca estudada demonstram que as áreas mais elevadas, horizonte A (*P1*), apresentam densidade de $1,15 \text{ g/cm}^3$, se caracterizando como um perfil mais argiloso, e que a densidade de partícula nesse ponto encontra-se com $2,4 \text{ g/cm}^3$, o que pode indicar uma alta taxa de infiltração no solo, essas taxas influenciaram a porosidade que foi de 53,50 %. Segundo Alves & Cabeda (1999), o processo de infiltração de água no solo é um dos fenômenos que melhor reflete as condições físicas internas do solo (ANDRADE *et al.*, 2009; REINERT *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2021; GUERRA; JORGE, 2021).

A amostra coletada em profundidade na voçoroca, horizonte B (*P2*), indica um solo arenoso, com uma densidade de solo de $1,35 \text{ g/cm}^3$, densidade de partícula de $2,6 \text{ g/cm}^3$ e porosidade de 49,17 %, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de porosidade e densidade da voçoroca.

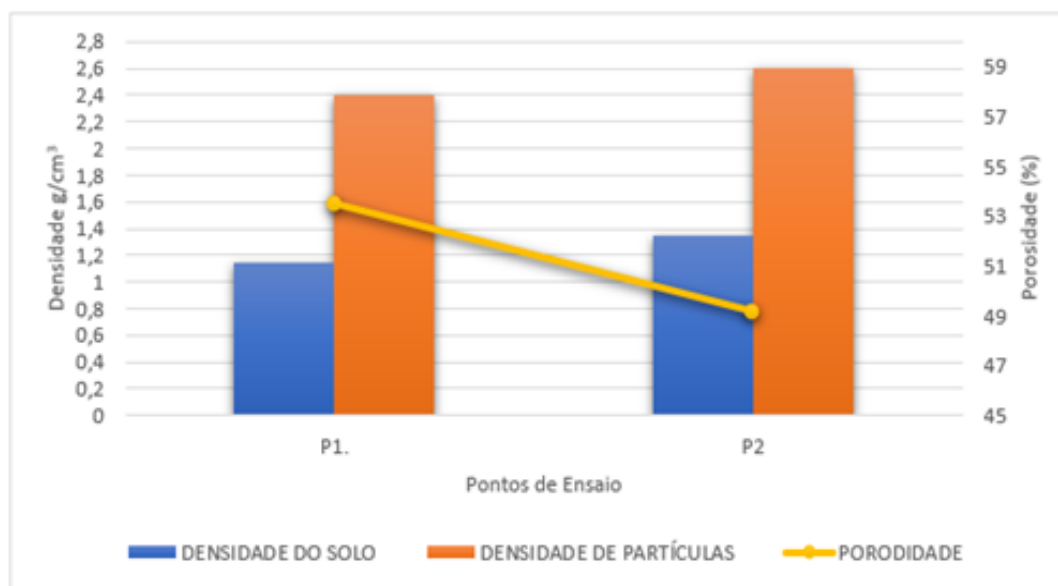
Pontos	Densidade do solo (g/cm ³)	Densidade de Partículas (g/cm ³)	Porosidade (%)
P1	1,15	2,4	53,5
P2	1,35	2,6	49,17

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Segundo Lepsch (2002) o solo ideal apresentaria 50% de poros, com 25% ocupados por água e 25% ocupados por ar. Além disso, a área da voçoroca está dentro de uma região urbanizada, com suas margens utilizadas para atividades humanas, aumentando a compactação do solo e reduzindo os valores de porosidade, comprometendo propriedades como infiltração e permeabilidade.

Os dados indicam uma menor taxa de infiltração em relação ao horizonte A, o que tende a aumentar o escoamento superficial e a aceleração das perdas de solo e de água, alterando o equilíbrio hidrológico natural do sistema. Uma melhor visualização desses dados pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 - Dados comparativos da densidade do solo, densidade de partículas e porosidade da voçoroca.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diversos problemas socioambientais são causados pela existência da erosão, tais como poluição, movimento de massa e assoreamento dos mananciais, o uso e manejo inadequados do solo reduzem também a cobertura vegetal o que influencia diretamente na infiltração da água no solo, ocasionando o escoamento superficial gerando mais erosão (SÁ; ROCHA FILHO, 2020; GUERRA; JORGE, 2021).

CONCLUSÃO

Considerando as observações de campo, bem como os resultados preliminares da análise multivariada da voçoroca localizada na área urbana de Miguel Alves, foi possível observar o desenvolvimento espaço-temporal recente da feição erosiva em análise, com crescimento considerável da sua área total em apenas dez anos.

A evolução da voçoroca e dos processos erosivos internos e externos, estão relacionados a fatores naturais de situação de equilíbrio da natureza, mas certamente vêm se intensificando pela atividade humana, com destaque para o crescimento urbano do município ao longo do intervalo temporal estudado, e sua localização geográfica em relação à rede de drenagem, sendo este também um fator que contribui para os processos geomorfológicos associados à voçoroca.

Esses fatores associados às propriedades físicas analisadas da feição, apontam para uma alta fragilidade à erosão, sendo necessária a aplicação de medidas corretivas, antes que o processo de voçorocamento ganhe maiores proporções.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de incentivo à pesquisa de doutoramento da primeira autora, aos alunos de iniciação científica do Lagesolos pelo apoio nas análises físicas do solo: Diego Janoti Suarez, Ana Paula Furtado e Maria Vitoria G. Allochio e o suporte fornecido pelos professores Almir B. Lima e Hikaro K. B. Nunes na etapa de campo.

REFERÊNCIAS

ADEDIJI, A.; JEJE, L. K.; IBITOYE, M. O. Urban development and informal drainage patterns: Gully dynamics in Southwestern Nigeria. **Applied Geography**, v. 40, p. 90-102, 2013.

ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n. 4, p. 382-388, 2009.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; SILVA, C. O.; GOMES, A. A. N.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. **Atlas Climatológico do Estado do Piauí**. Série Documentos, 101. Teresina: EMBRAPA-Meio Norte, 2004.

BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2005.

BARBOSA, L. L.; MAIA, M. R. Mapeamento de ravinas e voçorocas nas margens do anel rodoviário da cidade de Vitória da Conquista-BA. **GEOPAUTA**, v. 4, n. 2, p. 227-244, 2020.

BERGSMA, E.; CHARMAN, P.; GIBBONS, F.; HURNI, H.; MOLDENHAUER, W.C.E.; PANICHAPONG, S. **Terminology for soil erosion and conservation**. Holanda: International Society of Soil Science: ITC, 1996.

BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T.; RODRIGUES, S. C. Variação da umidade superficial do solo em parcelas experimentais com uso de geotêxteis biodegradáveis, Uberlândia–MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1, 2012.

CEPRO. Centro de Pesquisas Econômicas Sociais do Piauí – Informações Municipais 2000 – **Anuário Estatístico do Piauí**. Teresina: Fundação Cepro, 2001.

CÓRDULA, E. B. L.; NASCIMENTO, G. C. C.; LUCENA, R. P. F. Comunidade, meio ambiente e etnociência: saberes locais na conservação dos recursos naturais. **Revista Brasileira De Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 13, n. 2, p. 85-103, 2018. DOI: <https://doi.org/10.34024/revbea.2018.v13.2551>

OLIVEIRA, J. A.; CÁSSARO, F. A.; PIRES, L. F. Estimating soil porosity and pore size distribution changes due to wetting-drying cycles by morphometric image analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104814, 2021.

MELO, L. M. R.; MANRIQUE, H. N.; MACHADO, J. H. R.; SILVA, H. A. Os impactos ambientais em decorrência da interferência negativa humana arraçoada pelo progresso econômico. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 74935-74952, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-063>

SÁ, L. N.; ROCHA FILHO, G. B. A Importância da Cobertura Vegetal no Processo de Erosão e Degradação do Solo no Ensino da Geografia. **International journal education and teaching**, v. 3, n. 3, p. 173-188, 2020.

FROTA FILHO, A. B.; VIEIRA, A. F. S. G. Monitoramento de Voçorocas na bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus – AM. In: VIEIRA, A. F. S. G; MOLINARI, D. C. (Org.). **Geografia Física da Amazonia**. São Paulo: Alexa Cultural; Manaus: EDUA, 2020, p. 45-59.

FOSTER, G. R. Modelling the erosion process. In: HANN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRANKENLEK, D.L. (Orgs.) **Hydrologic modeling of small watershed**. St. Joseph: ASAE; FAO, 1982. p. 297-382.

GÓES, A. M.; FEIJÓ, F. J. Parnaíba Basin; Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 8, p. 57-67, 1994.

EMBRAPA. **Mapa Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado do Piauí**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2018.

GUERRA, A. J. T. Experimentos e Monitoramentos em Erosão dos Solos. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 32-37, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0003>

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. D. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; SHOKR, M. S. Slope processes, mass movement and soil erosion: A review. **Pedosphere**, v. 27, n. 1, p. 27-41, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7)

GUERRA, A. J.T., JORGE, M. C. O., RANGEL, L. A., BEZERRA, J. F. R., LOUREIRO, H. A. S., GARRITANO, F. N. Erosão dos solos, diferentes abordagens e técnicas aplicadas em

voçorocas e erosão em trilhas. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, p. 75 – 117, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.vol1n1.p75-117.2020>

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. Degradação dos Solos—Abordagens Teóricas e Estudos de Casos, ao Longo de 25 Anos (1994–2019), no Âmbito do Lagesolos. **Humboldt-Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, v. 1, n. 2, 2021. Disponível em: <https://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/humboldt/article/view/57375/36820>

IMESON, A.C.; KWAAD, F.J.P.M. Gully types and gully prediction. K.N.A.G. **Geografisch Tijdschrift**, v. 14, n. 5, p. 430-441, 1980.

IRELAND, H.A.; SHARPE, C.F.S.; EARGLE, D.H. **Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina**. Washington: US Department of Agriculture Technical Bulletin, 1939.

KIEFER, A. P.; COSTA, R. M.; PETSCH, C.; SCCOTI, A. A. V. Panorama das Alterações nos Padrões de Precipitação e Erosão diante de Mudanças Climáticas: Revisão de Literatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1724-1747, 2021.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 1ª reimpressão 2005, São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2002.

LI, M.; LI, T.; ZHU, L.; MEADOWS, M. E.; ZHU, W.; ZHANG, S. Effect of land use change on gully erosion density in the black soil region of northeast China from 1965 to 2015: a case study of the Kedong County. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 111, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.652933>

LIMA, I. M. M. F.; AUGUSTIN, C. H. R. R. O relevo do espaço piauiense: aspectos de sua estruturação e evolução. Simpósio Nacional de Geomorfologia, VIII, Sensitividade de paisagens: geomorfologia e as mudanças ambientais, Recife, 2010, **Anais...**, Recife, 2010.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T.; ANDRADE, A. G. Contribuição ao estudo de voçorocas a partir do uso experimental de laser scanner terrestre e VANT. **Revista Brasileira de Geomorfologia. (Online)** v. 21, n. 4, p.871-892, 2020.

MARCHIORO, E.; FERNARDES, N.F.; MACEDO, J.R.; BHERING, S.B.; Gonçalves, A.O.; PRADO, R.B. Modelagem da produção de sedimentos usando cenário ambiental alternativo no noroeste do Rio de Janeiro - Brasil. **Revista Geografias** (UFMG), v. 10, p. 54-70, 2014.

MOHAMMED, S.; AL-EBRAHEEM, A.; HOLB, I. J.; ALSAFADI, K.; DIKKEH, M.; PHAM, Q. B.; SZABO, S. Soil management effects on soil water erosion and runoff in central Syria - A comparative evaluation of general linear model and random forest regression. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2529, 2020.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. Oxford: Publishing Blackwell, 3. ed., 2005.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p. 57-99.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003.

RAMALHO, M. F. J. L.; GUERRA, A. J. T. Relação entre erosão e deposição, comparando-se tais eventos com a textura de materiais colúvio-aluviais: uma análise preliminar. **Revista Geonorte**, v. 5, n. 23, p. 660-664, 2014.

REINERT, D. J., ALBUQUERQUE, J. A., REICHERT, J. M., AITA, C., & ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

SILVEIRA, L.R.; MENDONÇA, R. M. G. Análise, Monitoramento e Caracterização da Voçoroca Ribeirão da Cachorra em Paraíso do Tocantins – TO. **Engenharia Ambiental: pesquisa e tecnologia**, v. 6, n. 2, p. 231-250, 2009.

SPALEVIC, V., BAROVIC, G., VUJACIC, D., CUROVIC, M., BEHZADFAR, M., DJUROVIC, N.; BILLI, P. The Impact of Land Use Changes on Soil Erosion in the River Basin of Miocki Potok, Montenegro. **Water**, v. 12, n. 11, p. 2973, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FOTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VANMAERCKE, M.; PANAGOS, P.; VANWALLEGHEM, T.; HAYAS, A., FOERSTER, S.; BORRELLI, P.; POESEN, J., Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art. **Earth-Science Reviews**, v. 218, p. 103637, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>

VRIELING, A.; RODRIGUES, S.C.; BARTHOLOMEUS, H.; STEK, G. Automatic identification of erosion gullies with ASTER imagery in the Brazilian Cerrados. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2723-2738, 2007.