

Caracterização das voçorocas da área urbana de Rio Preto da Eva (AM), Norte do Brasil

Characterization of gullies in the urban area of Rio Preto da Eva (AM), Northern Brazil

Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira¹ , Carla Maria Rodrigues de Lima¹ , Gabriela Mendonça da Silva¹ 

¹Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas e Sociais, Setor Norte, Campus Universitário, Avenida General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I, CEP: 69080-900, Manaus, AM, BR (fabiovieira@ufam.edu.br; rodriguescarlamaria58@gmail.com; gabisg444@gmail.com)

Recebido em 19 de fevereiro de 2022; aceito em 15 de dezembro de 2022.

Resumo

A pesquisa apresenta o resultado do monitoramento das voçorocas existentes na área urbana da cidade de Rio Preto da Eva (AM), a caracterização do ambiente no entorno das incisões e o acompanhamento da expansão destas a partir de imagens de alta resolução espacial oriundas do veículo aéreo não tripulado (VANT). Assim, por meio das imagens geradas, foi possível calcular as taxas de erosão linear, fazer previsões de risco para cada incisão e estimar os danos materiais e os possíveis custos de contenção para cada incisão. Ao final, três voçorocas foram encontradas no perímetro urbano de Rio Preto da Eva. A primeira foi descrita como tendo forma bifurcada, tipo conectada, área de abrangência de 716,56 m², volume erodido de 7.667,19 m³ e danos materiais de R\$ 32.424,34; a segunda tinha forma retangular, tipo conectada, área de abrangência de 4.232,33 m², volume erodido de 94.804,19 m³ e danos materiais de R\$ 98.190,05; e a terceira apresentava forma retangular, tipo conectada, área de abrangência de 1.168,31 m², volume erodido de 20.795,91 m³ e danos materiais de R\$ 38.764,52. As 3 incisões provocaram, além da perda de área (6.117,20 m²) e do volume erodido (123.267,29 m³), o assoreamento dos canais a jusante. Os danos em termos reais relativos à área somam R\$ 169.378,91, ou US\$ 32.953,09, sendo que os custos de contenção totalizaram R\$ 1.886.544,48 ou US\$ 367.032 em 31 de agosto de 2021. Portanto, do ponto de vista ambiental e financeiro, as medidas preventivas seriam mais econômicas e viáveis, evitando, assim, o surgimento dessas voçorocas.

Palavras-chave: Voçoroca; Monitoramento; Veículo aéreo não tripulado.

Abstract

This research presented the result of the existing gully survey at the Rio Preto da Eva (AM) municipality urban area, the environmental characterization around the incisions, accompanying the expansion of these incisions from high spatial resolution images from the unmanned aerial vehicle (UAV). Thus, through the generated images, it was possible to calculate linear erosion rates, make risk predictions for each incision and estimate material goods damage and possible containment costs for each incision. In the end, 3 gullies were found at Rio Preto da Eva's urban perimeter. The first was described as having a bifurcated shape, connected type, covering an area of 716.56 m², eroded volume of 7,667.19 m³ and material goods damage of R\$ 32,424.34; the second was described with a rectangular shape, connected type, coverage area of 4,232.33 m², eroded volume of 94,804.19 m³, R\$ 98,190.05 in material goods damage; and the third, has a rectangular shape, connected type, coverage area of 1,168.31 m², eroded volume of 20,795.91 m³ and material goods damage of R\$ 38,764.52. The 3 incisions caused, in addition to the loss of usable area (6,117.20 m²) and eroded volume (123,267.29 m³), the silting of the channels downstream. The damages in real terms related to the area amount to R\$ 169,378.91 or US\$ 32,953.09. The containment costs total R\$ 1,886,544.48 or US\$ 367,032.00 on 08/31/2021. Therefore, preventive measures would be more economical and more viable from an environmental and financial perspective, thus avoiding the emergence of these gullies.

Keywords: Gully; Monitoring; Unmanned aerial vehicle.

INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural de desagregação e transporte de material. Muitas vezes, esse processo é intensificado pelo homem a partir da retirada da vegetação, terraplanagem, impermeabilização de vias e canalização da água pluvial, dentre outras ações. Em termos geomorfológicos, pode-se dizer que a erosão é um processo que envolve o destacamento e o transporte de solos e fragmentos de rochas de um lugar para outro (distante ou próximo do local de origem) (Dirane e Vieira, 2020).

Vale destacar que existem algumas condições naturais que atuam na deflagração da erosão do solo, como: declividade do terreno, solos suscetíveis, ausência de vegetação, intensidade e volume das chuvas etc. (Guerra, 2008; Vieira, 2008). Em ambientes alterados, tanto em áreas rurais como em áreas urbanas, podem surgir feições erosivas lineares, tais como os sulcos, as ravinas e as voçorocas.

O surgimento de feições erosivas depende das variações das taxas de erosão, as quais estão ligadas aos fatores controladores (Dirane e Vieira, 2020), que, segundo Guerra (2008), envolvem os processos hidrológicos, as propriedades físicas dos solos, a erosividade, as características da encosta e a cobertura vegetal. Juntamente com a formação e a expansão de incisões erosivas, ocorrem impactos ao meio ambiente, como o assoreamento de canais, a inutilização da área ocupada pela incisão e de seu entorno, a destruição de aparelhos urbanos, dentre outros (Silva e Vieira, 2020). A erosão por voçorocas é, portanto, uma preocupação ambiental importante em todo o mundo, como no planalto de Loess, na China, onde a ocorrência desse tipo de incisão tem provocado a degradação do solo (Jiang et al., 2021). Essa preocupação justifica-se porque esse processo reduz a produtividade agrícola, prejudica a infraestrutura instalada, tanto urbana quanto rural, degrada a qualidade das águas receptoras e pode causar perda de vidas (Roberts et al., 2022).

Do ponto de vista da caracterização, as voçorocas podem ser descritas como incisões erosivas que apresentam queda em bloco das camadas do solo, paredes verticais e fundo plano, formando secção transversal em U, e profundidade superior a 1,5 m (Vieira, 2008). Apesar de serem consideradas feições que caracterizam o ambiente como bastante degradado, em alguns lugares as voçorocas podem ser consideradas como sendo importantes feições que compreendem, por exemplo, geossítios, servindo, até mesmo, como objeto de turismo (Zgłobicki et al., 2021).

Para o monitoramento desse tipo de incisão, as técnicas são diversas, como uso de fichas cadastrais, estaqueamento (Guerra, 1995), poligonais planimétricas (Oliveira et al., 1996), levantamento por ordenada — utilizada até para monitorar movimentos de massa em margens de rios no Amazonas (Magalhães, 2011) — e, mais recentemente,

emprego de veículo aéreo não tripulado (VANT), que tem auxiliado no monitoramento e na caracterização dessas feições e também do ambiente por elas ocupado (Silva, 2017, 2021; Santana, 2018).

Essa ferramenta é capaz de realizar o recobrimento de uma área previamente delimitada de forma autônoma (Rodrigues, 2016). Além disso, ao se utilizar o VANT como técnica de monitoramento, é possível ter acesso a incisões que ficam localizadas em áreas mais remotas ou de difícil acesso, ter melhor detalhamento do terreno e, assim, produzir mapas ou modelos mais detalhados de uso e ocupação, modelo digital de elevação (MDE), modelo digital de terreno (MDT), declividade etc. Marzolf e Poesen (2009) indicaram o uso de fotografias aéreas digitais de alta resolução como possibilidade para estudos detalhados sobre voçorocas e, nesse caso, aplicam-se as imagens geradas pelos VANTs.

A erosão por voçorocas, portanto, causa perda de áreas produtivas, impacta na infraestrutura, contribui para a sedimentação excessiva de barragens (Roberts et al., 2022), dentre outras implicações. Apesar do conhecimento sobre esses impactos, a modelagem clássica da erosão por voçorocas ainda é recente (Roberts et al., 2022). Segundo Ioniță et al. (2022), no planalto da Moldávia (leste da Romênia), especificamente no planalto de Bârlad, ocorrem dois tipos de voçorocas: as descontínuas, localizadas principalmente nas encostas, e as grandes voçorocas contínuas, localizadas em fundos de vale. Segundo esses autores, vários métodos foram utilizados para medir com precisão e estimar o crescimento dessas voçorocas, tais como o monitoramento intensivo de campo durante o período de 1978 a 2000, usando o método de grade de estações, fotografias aéreas e análise de césio-137.

No Brasil, trabalhos como o de Hartwig e Alves (2022) descrevem a ocorrência de várias voçorocas no município de Alegre, no Espírito Santo, que chamam a atenção pelas suas dimensões, sendo estas registradas e analisadas quanto aos fatores ambientais que comandam seus respectivos desenvolvimentos. Hartwig e Alves (2022) utilizaram imagens do Google Earth Pro e as ferramentas do SIG para a localização dessas voçorocas, assim como para a descrição dos fatores ambientais responsáveis pelo seu surgimento. Muitos são os trabalhos que vêm monitorando voçorocas no Brasil, como os de Furtado et al. (2006) e Guerra et al. (2015), desenvolvidos na área urbana da cidade de São Luís, MA.

Marchioro et al. (2016) fizeram um balanço a respeito das publicações sobre voçorocas no Brasil, relativas aos trabalhos publicados no Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO), no período de 2004 a 2014, em que os autores apontam que a maioria dos trabalhos apresentados nesse período utiliza, para caracterização e monitoramento desse tipo de feição erosiva, técnicas de sensoriamento remoto, fotointerpretação com tratamento de imagens e monitoramento por estacas, sem, contudo, destacar o uso das imagens de VANTs, tal como ocorre neste trabalho.

Assim, o objetivo principal desta pesquisa foi monitorar as voçorocas existentes na área urbana da cidade de Rio Preto da Eva (AM), utilizando, para isso, as imagens obtidas por meio do VANT. Conseqüentemente, realizaram-se também a caracterização do ambiente no entorno das incisões, o acompanhamento da expansão dessas incisões e a mensuração dos danos ambientais e urbanos a elas relacionados.

ÁREA DE ESTUDO

Situada a 50 km, em linha reta, da capital do Amazonas, Rio Preto da Eva é uma das cidades pertencentes à Região Metropolitana de Manaus (RMM) (Figura 1). O surgimento da cidade tem origem na abertura da Rodovia AM-010, que liga Manaus a Itacoatiara, sendo a principal via de acesso entre essas cidades. Conta com 12.205 habitantes distribuídos em 11 km² de área urbana (IBGE, 2010a).

Geologicamente, o sítio urbano está assentado sobre a Formação Alter do Chão, datada do Cenozoico, caracterizada por depósitos aluviais, coluviais areno-argilosos e argilosos-arenosos, com ordenação estratigráfica ainda não definida (Sarges, 2008). Sobre essa formação desenvolveram-se relevos com modelados de dissecação fluvial de forma homogênea, com predominância de colinas e interflúvios tabulares, com um conjunto de formas de relevo

que delineiam feições de rampas suavemente inclinadas e lombadas, geralmente esculpidas em rochas sedimentares (IBGE, 2010b).

Por estar situada na Floresta Amazônica, a composição florestal da cidade corresponde a vegetação secundária, situada em áreas que sofreram interferência parcial ou total da estrutura vegetal primária pelo homem, tais como atividades agrícolas, urbanização, mineração, assim como a Floresta Ombrófila Aberta aluvial, na qual ocupa as áreas de planícies (IBGE, 2010c, 2012).

A cidade está estruturada à margem do Rio Preto da Eva, o qual leva o nome da cidade e do município. Na margem dos rios, encontram-se solos do tipo Neossolo Quartzarênico, que são caracterizados por serem pouco evoluídos a partir de sedimentos arenoquartzosos ou de arenitos e constituídos por material mineral (hidromórfico ou não) ou por material orgânico (SGB-CPRM, 2009). Em outras áreas da cidade, encontra-se o Latossolo, que é constituído por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A (SGB-CPRM, 2009; Santos et al., 2018).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o entendimento de como cada objetivo foi alcançado, segue a descrição sucinta de cada um, na ordem em que foram apresentados anteriormente.

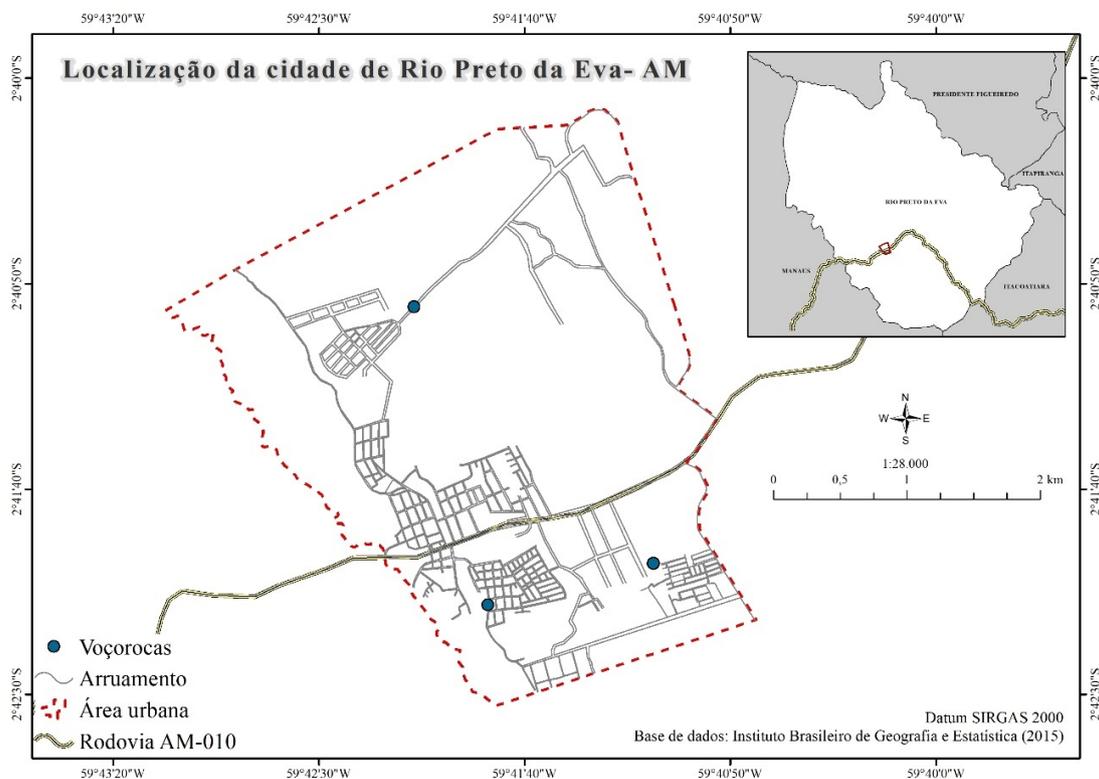


Figura 1. Mapa de localização da cidade de Rio Preto da Eva-AM.

Caracterização do ambiente no entorno das incisões

Para a caracterização do ambiente no entorno das incisões, realizou-se o monitoramento de cada uma por meio de um sobrevoo do VANT. Para que isso pudesse ocorrer de maneira segura, foi necessário que o espaço aéreo estivesse em condições de tempo bom (sem neblina, com pouco vento e sem possibilidade de chuva). Para esse primeiro momento, organizou-se previamente, ainda com a aeronave em solo, o plano de voo, com o uso do *software* Pix4D Capture. Neste, inseriram-se informações como: altitude de voo, tipo de *grid*, inclinação da câmera e área a ser monitorada (Santana, 2018; Silva, 2021).

Para o início da operação, no próprio *software* PIX4D escolhe-se o tipo de *grid* (Figura 2), neste caso, o *Grid Mission*; em seguida, determinam-se o ângulo da câmera, a altitude e a porcentagem de sobreposição das imagens. Após a inclusão dessas informações, faz-se a verificação dos itens (*Checklist*), entre o rádio controle e o VANT. Estando todos os itens aferidos, o voo acontece de forma automática.

Uma vez iniciado o voo, o VANT faz o mapeamento de forma autônoma, conforme as informações lançadas no *software*. Finalizado o voo, o conjunto de imagens é descarregado e tratado com a utilização do *software* Agisoft Photoscan Metashape, para a elaboração das imagens das voçorocas em 3D, MDT etc. Após as imagens serem descarregadas no computador por meio do *Agisoft*, realizaram-se os seguintes passos, conforme a barra de tarefas de 1 a 9:

- I. Fluxo de Trabalho;
- II. Adicionar Fotos;
- III. Alinhar Fotos;
- IV. *Build Dense Cloud*;
- V. Construir Modelo;
- VI. Construir Textura;
- VII. *Build Tiled Model*;

VIII. *Build DEM*;

IX. *Build Orthomosaic*.

Por meio dos sobrevoos, realizados de forma longitudinal e transversal nas voçorocas, foram feitos registros fotográficos para a identificação em detalhe de outros aspectos relacionados às feições secundárias.

Acompanhamento da expansão das voçorocas a partir das imagens do veículo aéreo não tripulado

Uma vez realizado o primeiro voo e, conseqüentemente, obtida a representação inicial da incisão, essa foi utilizada como parâmetro de comparação com as imagens que foram produzidas subsequentemente a esta. Com isso, foi possível mensurar o tamanho da incisão em termos de área (m^2) e volume erodido (m^3) entre cada monitoramento, utilizando-se o modelo de tamanho de voçoroca (Vieira e Albuquerque, 2004), sendo possível estabelecer as taxas de erosão em termos de crescimento linear. Isso se faz importante, pois poderá servir para os cálculos de risco erosivos, conforme metodologia utilizada, que estabelece uma escala com os seguintes níveis: imediato, a curto prazo, a médio prazo e a longo prazo (Tabela 1). Essa metodologia de previsão de risco utiliza a taxa de crescimento em metro (distância linear) e o tempo decorrido entre cada monitoramento.

Tabela 1. Escala de risco erosivo¹.

Nível	Distância ² (m)	Risco	Meses ³
1	0 – 3	Imediato	0 – 6
2	3 – 6	Curto Prazo	6 – 12
3	6 – 12	Médio Prazo	12 - 36
4	> 12	Longo Prazo	> 36

¹Modificado de Tavares et al. (2010); ²Menor distância da borda da voçoroca para algum ponto de referência (casa, rua, estrada, rodovia, etc.); ³Tempo estimado em que a voçoroca alcançará o ponto de referência.

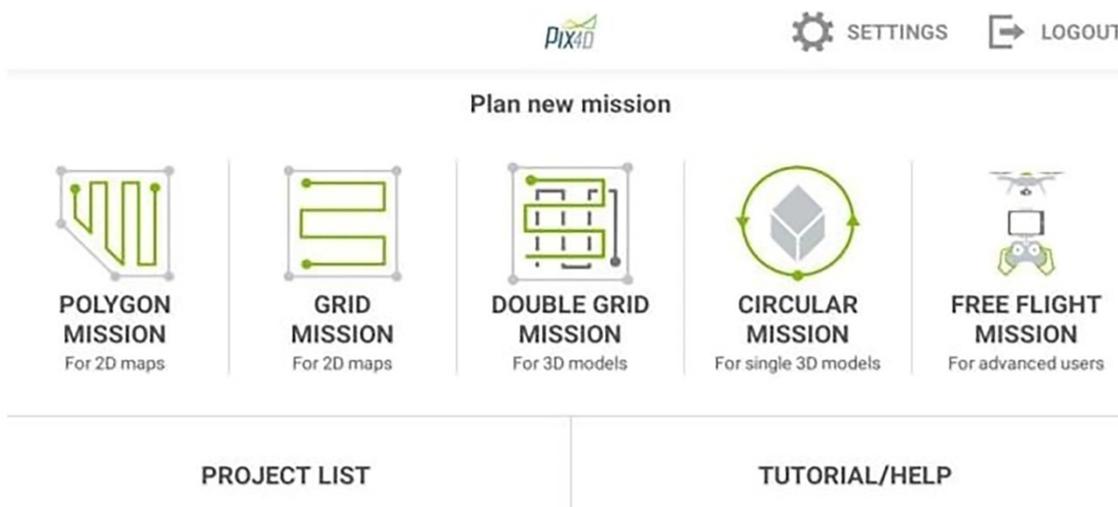


Figura 2. Interface de opção de missão no aplicativo do PIX4D.

Em um primeiro monitoramento, o risco é determinado apenas pela distância da cabeceira da voçoroca para algum ponto de referência. Já no segundo monitoramento o risco é estimado pelo tempo (em meses) que a voçoroca levará para atingir o ponto de referência estabelecido no monitoramento anterior, ou seja, a taxa de erosão linear determina (estimativa) o tempo que a voçoroca atingirá o ponto de referência. Para isso, basta aplicar esse simples cálculo da Equação 1:

$$C = (d^1 - d^2)/t \quad (1)$$

Em que:

C = crescimento linear-mensal, expresso em metros, em direção ao ponto de referência;

d^1 = distância entre a voçoroca e o ponto de referência no penúltimo monitoramento;

d^2 = distância entre a voçoroca e o ponto de referência no último monitoramento;

t = tempo (meses) entre os monitoramentos.

O resultado desse cálculo indicará o crescimento linear-mensal, que também poderia ser entendido como a taxa de erosão linear-mensal. No entanto, para determinar a escala de risco erosivo, basta dividir a distância real (distância do último monitoramento) por c, ou seja (Equação 2):

$$R = d/c \quad (2)$$

Na qual:

R = escala de risco erosivo, expresso em meses;

d = distância entre a voçoroca e o ponto de referência (último monitoramento);

c = crescimento linear-mensal.

O resultado desse último cálculo indicará a quantidade de meses necessários para a voçoroca atingir o ponto de referência. Com isso, verifica-se na tabela onde se encaixa o resultado e, conseqüentemente, qual será a escala de risco. Vale destacar que quanto mais frequentes forem os monitoramentos, mais precisos serão os cálculos das taxas de crescimento linear.

Mensuração dos danos ambientais e urbanos relacionados às incisões

A descrição e os cálculos de danos ambientais e urbanos tiveram como base inicial o valor do m^2 , estipulado pela Prefeitura de Rio Preto da Eva para cada bairro afetado por cada incisão, multiplicado pela área total da voçoroca. Podem ser somados a esses danos a destruição de aparelhos urbanos como a pista de acesso, a rede elétrica, as tubulações de águas pluviais e servidas, a destruição de casas, os custos

de remoção de famílias, as indenizações, entre outros, e os danos ambientais, como a inutilização da área abrangida e de influência da incisão, o assoreamento de canais pelo material oriundo dessas feições, a perda de vegetação e, até mesmo, a utilização destas como área de despejo de lixo da cidade.

Estimaram-se também os custos de contenção aproximada de cada voçoroca. A esse respeito, calcularam-se os custos de contenção de cada voçoroca, tendo como base o valor em dólar (US\$ 60/ m^2) — parâmetro já utilizado em outras pesquisas na região (Vieira, 1998) —, que depois foi convertido para a moeda local (Real).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do ambiente no entorno das incisões

Monitoraram-se três voçorocas (Figura 3) situadas na área urbana de Rio Preto da Eva. A primeira está localizada no Bairro da Paz, na Rua 31 de Março (voç. 1), a segunda no Residencial São Sebastião (voç. 2) e a terceira às margens de via não pavimentada (voç. 3).

A primeira voçoroca identificada na cidade (voç. 1) surgiu a partir da concentração das águas pluviais e servidas (água oriunda das residências) direcionada para a encosta sem adequado tratamento. Soma-se a isso a utilização desta como área de despejo de lixo pelos moradores do entorno (Figura 4), ação que, de certa forma, contribui para a maior degradação do ambiente, culminando na poluição do curso d'água a jusante.

A segunda incisão verificada (voç. 2) está localizada no Conjunto Residencial São Sebastião (Figura 5). O surgimento dessa feição está diretamente associado à construção do conjunto residencial, no qual a drenagem pluvial foi direcionada para a encosta de forte declividade, sem a presença de dissipadores de energia e a meia-encosta.

Na borda esquerda, verifica-se a construção de residências irregulares que ultrapassaram o limite do conjunto habitacional (Figura 6), as quais estão mais propícias a serem afetadas pela incisão do que contribuem para a expansão desta. Ao passo que as moradias regulares contribuem diretamente com o fornecimento de água para o interior da voçoroca, o que, juntamente com as chuvas, favorece a expansão contínua dessa feição erosiva. A existência de canalizações nas cabeceiras de algumas voçorocas deixa evidente a importância da drenagem artificial como fator formador dessas e de outras feições (Vieira, 2008).

A terceira voçoroca identificada (Figura 7) fica localizada em uma via não pavimentada. Possivelmente, o surgimento dessa incisão deu-se em decorrência da abertura dessa via. Quanto à forma, foi caracterizada como retangular, e quanto ao tipo, como conectada.

Não há residências próximas ao entorno da incisão, apenas a estrada não pavimentada. Para Bigarella e Mazuchowski (1985), estradas não pavimentadas são apontadas como um dos condicionantes para o surgimento de voçorocas de origem antrópica.

Essas três incisões podem ser agrupadas em dois modelos de surgimento e evolução de voçorocas, tal como descrito para Manaus, em 2008, sendo as voçorocas 1 e 2 relacionadas ao modelo esquemático 6, adaptado do modelo 1 (Vieira, 2008), o qual se refere à abertura de vias de acesso, sistemas de drenagem pluvial com saída à meia-encosta, incluída aqui a construção de moradias (Figura 8); e a voçoroca 3, ligada ao modelo esquemático 7, adaptado do modelo 1 (Vieira, 2008), o qual se refere à abertura de vias de acesso com drenagem pluvial à meia-encosta, mas, no caso específico, sem o sistema de drenagem e sem ocupação (Figura 9).

Acompanhamento da expansão das voçorocas a partir de imagens do veículo aéreo não tripulado

Voçoroca 1

Essa incisão encontra-se em área urbanizada (Figura 10). No campo realizado em dezembro de 2019, verificou-se que houve tentativa de contenção da voçoroca, por parte do proprietário do terreno, por meio da canalização da água da chuva. Em janeiro de 2020, a voçoroca aumentou, principalmente em largura, e verificou-se, nesse momento, maior acúmulo de lixo em seu interior.

Em novembro de 2020, evidenciou-se aumento da largura e do comprimento da voçoroca, mas que se manteve

estável apenas em profundidade, resultados estes obtidos por meio dos dados morfométricos da voçoroca (Tabela 2). Na tentativa de contenção por parte dos moradores, mais lixo foi jogado no seu interior, ocorrendo, nesse mesmo período, aumento da vegetação interna e nas bordas, fato observado desde o monitoramento realizado em janeiro de 2020.

No monitoramento seguinte (19 de novembro de 2020), a estrutura física da segunda residência, que havia sido desmontada, mantinha-se no local. Entretanto, no último campo realizado no final do mesmo ano, essa estrutura havia sido retirada, devido ao aumento da incisão (Figura 10). A instabilidade da voçoroca provocou o crescimento da cabeceira



*As setas apontam para o acúmulo de lixo no interior da incisão. Fonte: imagem obtida por meio do VANT em 16 de dezembro de 2019.

Figura 4. Voçoroca situada na Rua 31 de Março, Rio Preto da Eva-AM*.



Fonte: imagens obtidas da plataforma Google Earth Pro e do VANT em 19 de novembro de 2020.

Figura 3. Mapa de localização das voçorocas de Rio Preto da Eva-AM.

na qual a feição de forma retangular passou a ter duas cabeceiras, mudando, portanto, para a forma bifurcada.

Voçoroca 2

A consolidação do Conjunto Residencial São Sebastião colaborou para o surgimento da feição, juntamente com o desmatamento, a exposição do solo, a terraplanagem e



Fonte: imagem obtida por meio do VANT em 24 de agosto de 2021.

Figura 5. Voçoroca situada em conjunto residencial, Rio Preto da Eva-AM.

a canalização das águas pluviais e servidas. Observou-se que o principal agente de expansão desta incisão é a água canalizada, que é despejada diretamente na sua cabeceira.

Por meio da sequência temporal (Figura 11), notou-se, pelas imagens feitas pelo VANT no campo realizado em novembro de 2020, aumento da cabeceira da voçoroca em direção às residências quando comparadas às imagens obtidas nos campos anteriores.

Essa voçoroca foi caracterizada como de forma retangular e do tipo conectada. Ela apresentou o maior potencial de degradação em relação às demais, visto que a construção do ortomosaico permitiu visualizar o material erodido desta e depositado no canal a jusante (Figura 12).



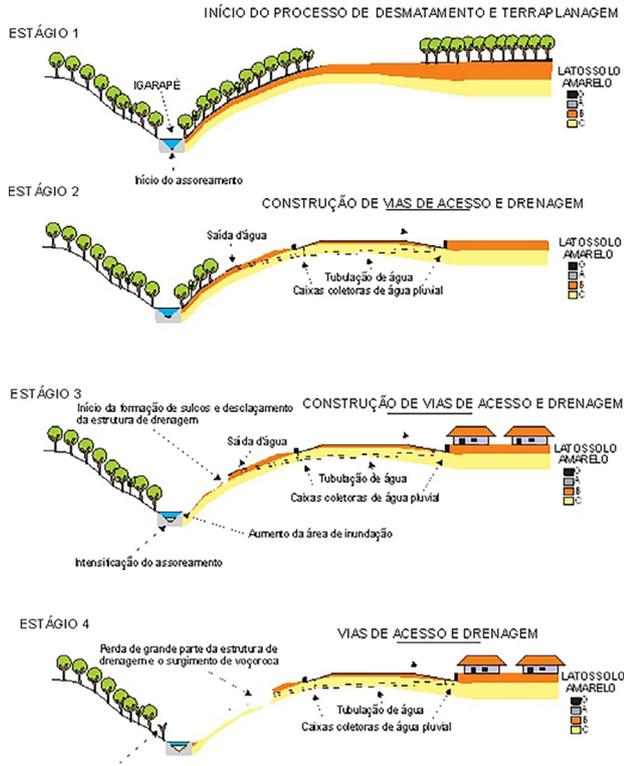
Fonte: VANT – Latossolo (19 de novembro de 2020).

Figura 7. Voçoroca 3 em margem de via não pavimentada, Rio Preto da Eva-AM.



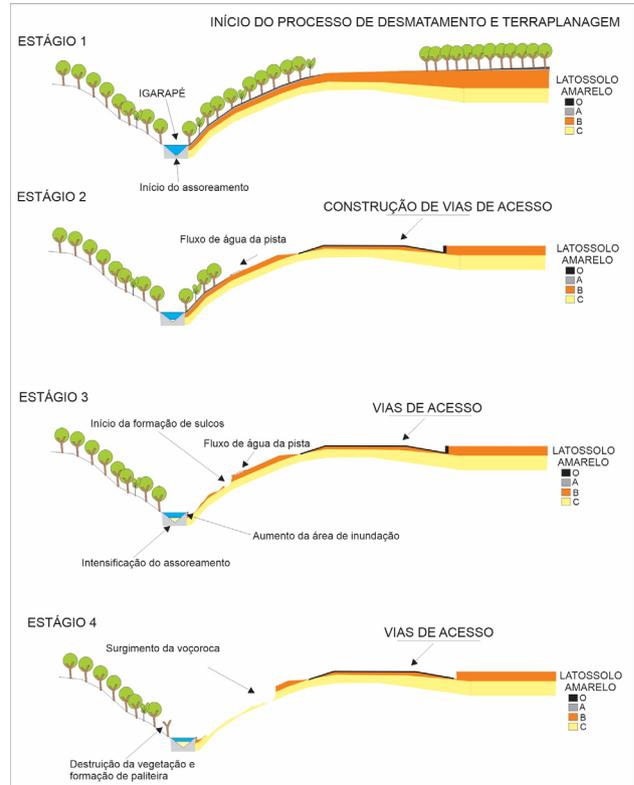
Fonte: imagem obtida por meio do VANT em 19 de novembro de 2020.

Figura 6. (A) Residências regulares e (B) residências irregulares. Rio Preto da Eva-AM.



Fonte: adaptado do modelo 1 de Vieira (2008).

Figura 8. Modelo Esquemático de surgimento de voçorocas – desmatamento, terraplanagem, drenagem à meia-encosta e ocupação.



Fonte: adaptado do modelo 1 de Vieira (2008).

Figura 9. Modelo Esquemático de surgimento de voçorocas: desmatamento, terraplanagem, abertura de via de acesso, sem ocupação.



Fonte: imagens obtidas a partir do VANT nos anos de 2019 e 2020.

Figura 10. Evolução da voçoroca na rua 31 de março, Rio Preto da Eva-AM.

Tabela 2. Dados morfométricos das voçorocas mapeadas.

Voçoroca	Comp. (m)	Larg. Média (m)	Prof. (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
1*	32,7	19,83	10,7	648,44	6.938,31
2*	116,0	31,13	17,9	3.611,08	64.638,33
3**	45,1	22,06	17,1	994,90	17.429,34

Fonte: imagens do VANT obtidas em *dez. 2019; **jan. 2020.

Voçoroca 3

A falta de planejamento na cidade possibilitou o surgimento da feição com abertura da estrada. Vale destacar a observação de Bigarella e Mazuchowski (1985), quando afirmam que os movimentos de massa frequentes ao longo dos cortes nas rodovias ocasionam a desestabilização da encosta, possibilitando, conseqüentemente, o surgimento de voçorocas de origem antrópica. Apesar de esta incisão não ter sido originada por movimentos de massa, a abertura dessa estrada possibilitou o direcionamento das águas da pista para a encosta, abrindo uma incisão menor (possivelmente sulco, e que depois evoluiu para ravina) que evoluiu para a atual voçoroca (Figura 13). Do monitoramento realizado em janeiro de 2020 para o último, em agosto de 2021, verificou-se que a incisão manteve seus parâmetros dimensionais, demonstrando, portanto, estabilidade.

Os dados morfométricos, referentes aos monitoramentos de dezembro de 2019 e de janeiro de 2020 de cada voçoroca, mostram que a maior feição encontrada na cidade é a voç. 2, com 64.638,33 m³ de material erodido, seguida da voç. 3, com 17.429,34 m³, e, por último, da voç. 1, com 6.938,31 m³ (Tabela 2). Os dados morfométricos referentes ao monitoramento de dezembro de 2020 mostram que as feições seguem a mesma ordem de tamanho dos monitoramentos anteriores, entretanto com maior valor de material erodido. A voç. 2 continua sendo a maior feição encontrada na cidade, agora com 73.551,28 m³ de material erodido, seguida da voç. 3, com 20.795,91 m³, e, por último, está a voç. 1, com 7.667,19 m³ (Tabela 3). Foi a única incisão que evoluiu no último monitoramento (Tabela 4).

Quanto ao comprimento das voçorocas monitoradas, todas apresentaram aumento até dezembro de 2020. Também

apresentaram aumento em largura e profundidade, exceto a voç. 1, a qual manteve a profundidade do monitoramento anterior. No último monitoramento (agosto de 2021), apenas a voç. 2 evoluiu, mas somente em comprimento e profundidade, mantendo-se com a mesma largura.

Os dados coletados (Tabela 5) aplicam-se ao quadro de previsão de risco criado por Tavares et al. (2010), no qual são apresentados os dados referentes à distância de cada voçoroca para a pista, tendo como objetivo fazer a previsão de risco dessas incisões.

Foram realizados quatro monitoramentos, em um intervalo de 1 mês do primeiro monitoramento para o segundo e de 10 meses do segundo para o terceiro, e de 9 meses do terceiro para o último. Até dezembro de 2020, todas as incisões apresentavam risco a médio prazo, sendo a incisão 3



Fonte: mosaico de imagens obtidas pelo VANT e tratadas no software Agisoft Metashape (2020).

Figura 12. Material erodido e depositado no canal a jusante da voçoroca.



Fonte: imagens obtidas por meio do VANT nos anos de 2019 e 2020.

Figura 11. Evolução de voçoroca do conjunto residencial, Rio Preto da Eva-AM.

a única que se manteve estável durante todos os monitoramentos. Em agosto de 2021, a voç. 1 manteve-se com a indicação de risco a médio prazo, a voç. 2 passou para risco imediato (crescimento médio de quase 0,44 m/mês), e a voç. 3, para risco a longo prazo.

Mensuração dos danos ambientais e urbanos relacionados às incisões

A base inicial para calcular os danos ambientais e urbanos foram os valores do m² estipulado pela Prefeitura de

Rio Preto da Eva para cada bairro, sendo eles: Centro, Carlos Braga e Conjunto Residencial São Sebastião. As localizações das voçorocas correspondem a dois bairros dos três fornecidos: a primeira voçoroca corresponde ao Centro; a segunda, ao conjunto residencial; e a terceira, à via não pavimentada. Para o cálculo dos danos por área, utilizaram-se os valores do m² por bairro fornecidos pela prefeitura, exceto para a voç. 3, em que foi obtida uma média do m² existente para três bairros da cidade de Rio Preto da Eva [Centro: R\$ 45,25 (voç. 1); Conjunto: R\$ 23,20 (voç. 2); e Carlos Braga: R\$ 31,10]. A média desses



Fonte: imagens obtidas por meio do VANT nos anos de 2019 e 2020.

Figura 13. Evolução da voçoroca em via não pavimentada, Rio Preto da Eva-AM.

Tabela 3. Dados morfométricos das voçorocas mapeadas.

Voçoroca	Comp. (m)	Larg. (m)	Prof. (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
1	33,8	21,2	10,7	716,56	7.667,19
2	119	33,2	18,6	3.954,37	73.551,28
3	47,3	24,7	17,8	1.168,31	20.795,91
TOTAL				5.839,24	102.014,38

Fonte: imagens obtidas por meio do VANT em dez. 2020.

Tabela 4. Dados morfométricos das voçorocas mapeadas.

Voçoroca	Comp. (m)	Larg. média (m)	Prof. (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
1	33,8	21,2	10,7	716,56	7.667,19
2	127,48	33,2	22,40	4.232,33	94.804,19
3	47,3	24,7	17,8	1.168,31	20.795,91
TOTAL				6.117,20	123.267,29

Fonte: imagens obtidas por meio do VANT em ago. 2021.

três valores (R\$ 33,18) foi utilizada para o cálculo dos danos por área da voç. 3 (Tabela 6).

Com os valores do m² dos referidos bairros multiplicados pela área total de cada voçoroca, obtiveram-se os valores dos danos relativos à perda de área. Assim, os resultados mostram que a feição que causou maior dano foi a voç. 2 (R\$ 98.190,05), seguida da voç. 3 (R\$ 33.010,78) e, por último, da voç. 1 (R\$ 29.341,91). Vale destacar que os danos monetários podem ser ainda maiores, quando somados à perda de duas casas (voç. 1) e à desvalorização imobiliária da área do entorno das voçorocas. Somam-se também os danos ambientais provocados e a perda de aparelhos urbanos (pista de acesso, asfalto, canaletas, bueiros etc.), os quais não foram aqui calculados. Quando realizados os cálculos para a contenção dessas incisões, com base no valor de U\$ 60/m² (Vieira, 1998), são obtidos outros valores (Tabela 7).

Os cálculos mostram que a contenção com o maior custo seria a da voç. 2, com investimento de R\$ 1.305.250,57, seguida da voç. 3, com R\$ 360.306,80 e, por último, da voç. 1, com R\$ 220.987,10, totalizando R\$ 1.886.544,47. Em termos de valor da moeda americana (dólar), o total seria de US\$ 367.032 para o dia 31 de agosto de 2021.

CONCLUSÕES

Para chegar a um diagnóstico em relação ao mapeamento e à caracterização das voçorocas da cidade de Rio Preto da Eva, realizaram-se análises de imagens obtidas por meio do VANT assim como por meio de visitas *in loco*. Este projeto surgiu da necessidade de continuidade da pesquisa do projeto de iniciação científica referente às degradações ambientais encontradas no espaço urbano de Rio Preto da Eva, principalmente no monitoramento das voçorocas, pois estas agregavam outros problemas além da degradação do solo.

Os dados morfométricos mostram que a voç. 2 continua sendo a maior feição encontrada na cidade, seguida da voç. 3 e, por último, da voç. 1. Ao final do monitoramento, percebeu-se que somente a voç. 2 continua ativa, enquanto as outras duas estão em estado estável (podendo ser reativadas após algum evento episódico — como chuva concentrada ou mesmo após mudanças na dinâmica de captação da água das chuvas e servidas, por exemplo).

No que se refere aos valores dos danos relativos à perda de área, os resultados mostram que a feição que causou maior dano foi a voç. 2, seguida da voç. 3 e, por último, da voç. 1. A realização dos cálculos para a contenção dessas incisões segue a mesma ordem dos cálculos de danos, em que a contenção com o maior custo seria a da voçoroca 2, seguida da voçoroca 3 e, depois, da voç. 1. Somados os danos por área (R\$ 160.542,74) e os custos de contenção (R\$ 1.812.056,62), o total alcança R\$ 1.972.599,36, podendo aumentar, se acrescidos os valores relativos à perda de moradias (duas casas), à desvalorização imobiliária, aos danos ambientais em termos monetários e às perdas de aparelhos urbanos (asfalto, canalização, calçadas, meio-fio etc.), não calculados para esta pesquisa.

Além das perdas de áreas por erosão, assoreamento dos canais a jusante destas, as voçs. 1 e 2 apresentam ainda como problema o fato de serem utilizadas como área de despejo de lixo doméstico.

O presente trabalho expõe a fragilidade de três pontos da área urbana de Rio Preto da Eva, com a presença dessas incisões erosivas e os impactos correlatos. Destaca-se o alerta de que outros pontos da área urbana possam desenvolver esse mesmo tipo de feição erosiva, caso os cuidados com o uso e a ocupação do meio físico não sejam observados. Finaliza-se a presente pesquisa com o desejo de que as incisões aqui descritas recebam alguma medida de contenção para tornar o ambiente minimamente equilibrado, evitando, assim, a consolidação desses pontos como áreas de risco erosivo.

Tabela 5. Distância da pista, taxa de crescimento e previsão de risco das voçorocas.

Voçoroca	19/12/2019	11/01/2020	19/11/2020	24/08/2021	Tx. De cresc. m/mês	Risco
1	10,60	10,20	10,20	10,20	0,00	Médio prazo
2	---	8,48	---	0	0,44	Curto Prazo
3	17,30	0	17,30	17,30	0,00	Longo Prazo

Tabela 6. Média dos bairros × área total da voçoroca.

Voçoroca	Valor do m ² / bairros (R\$)	Área erodida (m ²)	Dano/área (R\$)
1*	45,25	716,56	32.424,34
2**	23,20	4.232,33	98.190,05
3***	33,18	1168,31	38.764,52
TOTAL		6.117,20	169.378,91

*Centro; **conjunto habitacional; ***via não pavimentada.

Tabela 7. Custo da contenção por voçoroca.

Voçoroca	Valor da contenção m ² (US\$)	Valor da contenção m ² (R\$)	Área (m ²)	Valor total (R\$)
1*	US\$ 60	308,40	716,56	220.987,10
2*	US\$ 60	308,40	4.232,33	1.305.250,57
3**	US\$ 60	308,40	1.168,31	360.306,80
TOTAL		6.117,20	6.117,20	1.886.544,47

*Valor do dólar convertido em reais no dia 31/08/2021 (US\$ 60 × R\$ 5,14).

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa ao segundo autor relativo ao projeto PIB-H/0034/2020.

REFERÊNCIAS

- Bigarella, J. J., Mazuchowski, J. Z. (1985). Visão integrada da problemática da erosão. In: Simpósio Nacional de Controle da Erosão, 3., 1985. *Anais* [...]. Curitiba: ADEA/ABGE.
- Dirane, A. C. M., Vieira, A. F. S. G. (2020). Mapeamento das voçorocas na rodovia AM-010 Manaus/Itacoatiara - AM. In: Vieira, A. F. S. G.; Molinari, D. C. (Eds.). *Geografia Física da Amazônia*: volume 1. São Paulo: Alexa Cultura; Manaus: EDUA. p. 15-27.
- Furtado, M. S., Ribeiro, F. V., Sousa, U. D. V., Mendonça, J. K. S., Guerra, A. J. T. (2006). Processo de recuperação da voçoroca do sacavém, São Luís – MA. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia e Regional Conference on Geomorphology, 6., 2006. *Anais* [...]. Goiânia: UGB.
- Guerra, A. J. T. (1995). Processos erosivos nas encostas. In: Cunha, S. B., Guerra, A. J. T. (Eds.). *Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 139-155.
- Guerra, A. J. T. (2008). Processos erosivos nas encostas. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 8a. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p.149-209.
- Guerra, A. J. T., Bezerra, J. F. R., Fullen, M. A., Mendonça, J. K. S., Jorge, M. C. O. (2015). The effects of biological geotextiles on gully stabilization in São Luís, Brazil. *Natural Hazards*, 75, 2625-2636. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1449-0>
- Hartwig, M. E., Alves, J. P. I. (2022). Spatiotemporal analysis of gullies and environmental controlling factors in the municipality of Alegre (state of Espírito Santo, southeastern Brazil). *Geologia USP. Série Científica*, 22(2), 29-42. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v22-194316>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010a). *Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010b). *Mapa do estado do Amazonas*: Geomorfologia. Diretoria Geociências. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010c). *Mapa do estado do Amazonas: Vegetação*. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2012). *Manual técnico de vegetação brasileira*. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2015). *Malha de Setores Censitários*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Ioniță, I., Niacșu, L., Poesen, J., Fullen, M. A. (2022). Medium-term development of discontinuous gullies. *Geomorphology*, 398, 108024. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108024>
- Jiang, C., Fan, W., Yua, N., Liu, E. (2021). Spatial modeling of gully head erosion on the Loess Plateau using a certainty factor and random forest model. *Science of the Total Environment*, 783, 147040. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147040>
- Magalhães, R. C. (2011). *As características físicas, químicas, mineralógicas e hidráulicas do solo e sua susceptibilidade ao processo de terras caídas: Comunidade do Divino Espírito Santo – Iranduba/AM*. Dissertação (Mestrado). Manaus: PP GEOG - UFAM. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/2798>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Marchioro, E., Lemos, F. H., Almeida Junior, H. C., Ferreira, I. G., Jaques, J. L., Carvalho Júnior, S. M., Oliveira, P. C. R., Domínguez, V. A., Cupertino, W. (2016). Voçorocas no Brasil: aspectos conceituais, dimensionais e metodológicos. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 11., 2016. *Anais* [...]. Maringá: UEM. p. 1-11.
- Marzloff, I., Poesen, J. (2009). The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology*, 111(1-2), 48-60. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.047>
- Oliveira, M. A. T., Vieira, A. F. G., Possas, H. P., Paisani, J. C., Lopes, L. J., Lima, M. S. B., Pontelli, M. E. (1996). Evolução de voçorocas e integração de canais em áreas de cabeceira de drenagem: município de Resende (RJ). *Sociedade & Natureza*, 8(15), 201-205. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadenatureza/article/view/61827/31933>. Acesso em: 16 out. 2020.
- Roberts, M. E., Burrows, R. M., Thwaites, R. N., Hamilton, D. P. (2022). Modelling classical gullies – A review. *Geomorphology*, 407, 108216. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108216>

- Rodrigues, A. A. (2016). *Uso de Veículos Aéreos não Tripulados para Mapeamento e Avaliação de Erosão Urbana*. Dissertação (Mestrado). Goiânia: Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFG/IESA. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/6646>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Santana, G. F. (2018). *Monitoramento de voçorocas utilizando veículo aéreo não tripulado (VANT) em áreas de difícil acesso em Manaus-AM*. Relatório de Pesquisa. Manaus: PROPESP – UFAM.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Oliveira, J. B., Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5ª ed. Distrito Federal: EMBRAPA. 356 p. Disponível em: <https://www.bdpa.cnp-tia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=1094003&biblioteca=vazio&busca=1094003&qFacets=1094003&sort=&paginaAtual=1>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Sarges, R. R. (2008). *Relações entre estruturas tectônicas, sedimentação coluvial e geomorfogênese na região de Manaus, Amazonas*. 109 f. Tese (Doutorado). São Paulo: Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica - USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2008.tde-15082008-140644>
- Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM). (2009). *Mapa Geodiversidade do Estado do Amazonas*. Manaus: CPRM. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14690>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Silva, G. M. (2017). *Monitoramento de voçorocas utilizando veículo aéreo não tripulado (VANT) em áreas de difícil acesso no Amazonas, Brasil*. Relatório de Pesquisa. Manaus: PROPESP – UFAM.
- Silva, G. M. (2021). *Geomorfologia aplicada à caracterização da vulnerabilidade à erosão em Rio Preto da Eva (AM)*. Dissertação (Mestrado). Manaus: PPGEOP – UFAM. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/8470>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Silva, G. M., Vieira, A. F. S. G. (2020). Mapeamento de voçorocas na cidade de Rio Preto da Eva (AM). *Revista Geosaberes*, 11, 517-531. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53667>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- Tavares, J. S., Vieira, A. F. G., Barbosa, A. J., Farias, A. S. (2010). Análise preliminar da ocorrência de voçorocas na BR 174, Trecho Manaus - Presidente Figueiredo (AM). In: Simpósio Nacional de Geomorfologia - Sensitividade de Paisagens: Geomorfologia e as Mudanças Ambientais, 8., 2010. *Anais [...]*. Recife: UFPE.
- Vieira, A. F. G. (1998). *Erosão por voçorocas em áreas urbanas: o caso de Manaus (AM)*. 181f. Dissertação (Mestrado). Florianópolis: CFCH – UFSC. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77508>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Vieira, A. F. G. (2008). *Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais*. Tese (Doutorado). Florianópolis: CFCH – UFSC. 310f. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91352>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Vieira, A. F. G., Albuquerque, A. R. C. (2004). Cadastramento de voçorocas e análise de risco erosivo em estradas: BR-174 (Trecho Manaus – Presidente Figueiredo). In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 5., e Encontro Sul-Americano de Geomorfologia, 1., 2004. *Anais [...]*. Santa Maria: UGB/UFMS. p. 50-65. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/app/webroot/sinageo/5/5/Antonio%20Fabio%20Guimaraes%20Vieira.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- Zgłobicki, W., Poesen, J., Joshi, V., Sólé-Benet, A., De Geeter, S. (2021). Gullies and Badlands as Geoheritage Sites. In: Singh, R. B., Wei, D., Anand, S. (eds.). *Global Geographical Heritage, Geoparks and Geotourism: Geoconservation and Development*. Cingapura: Springer Nature Singapore. p. 147-172. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4956-4_9