

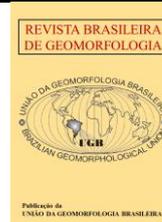


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, nº ESPECIAL (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2366>



Artigo de Pesquisa

Análise da distribuição espacial de voçorocas na bacia do rio Pandeiros-MG: uma abordagem geomorfológica

Analysis of the spatial distribution of gullies in the Pandeiros-MG river basin: a Geomorphological approach

Arnon Costa Pereira de Lima¹, Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin², Diego Alves de Oliveira³ e Tiago Amâncio Novo⁴

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, IGC, Belo Horizonte, Brasil. arnonbhmg@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3538-7106>

² Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, IGC, Belo Horizonte, Brasil. chaugustin@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3793-9989>

³ Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, e Professor do Programa de Pós-graduação em Ensino de Geografia em rede, Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Preto, Brasil. diego.oliveira@ifmg.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6325-0459>

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. tiagonovo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1999-862X>

Recebido: 01/03/2023; Aceito: 17/10/2023; Publicado: 12/12/2023

Resumo: Este trabalho investiga fatores associados à distribuição espacial de 215 voçorocas que ocorrem em 5 grupos bem definidos em bacia de drenagem de afluente do médio rio São Francisco, MG, Brasil, a partir da análise de mapas geológico, declividade, hipsométrico e knickpoints, e da amostragem do material do regolito de uma vertente/voçoroca de cada um dos grupos. Os resultados da Análise de Componentes Principais (ACP) dos parâmetros físicos (granulometria) e químicos (pH - H₂O/ KCl), condutividade elétrica, matéria orgânica, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²O₃, Al²O₃ e TiO₂) dos regolitos, bem como dos mapas, indicam a existência de controles litoestruturais na ocorrência de rupturas de declive acentuadas, que influenciam na aceleração dos fluxos de escoamento superficial, favorecendo o voçorocamento em áreas específicas da bacia. A ACP possibilitou a comparação entre os parâmetros dos regolitos das cinco vertentes/voçorocas, mostrando que o primeiro componente principal (PC1), relacionado ao silte, e o PC2, à areia grossa, respondem por 45% da variância total dos parâmetros físicos e químicos analisados. Os gráficos biplot da ACP apontam que há heterogeneidade desses parâmetros, significando que há variações entre as características físicas e químicas entre as cinco vertentes/voçorocas sugerindo que estas não respondem diretamente pelo agrupamento das voçorocas.

Palavras-chave: Agrupamento de Voçorocas; Vertentes; Regolito; Propriedades físicas e químicas; Análise de Componentes Principais.

Abstract: This work investigates factors associated with the spatial distribution of 215 gullies that occur in 5 well-defined groups in the drainage basin of a tributary of the middle São Francisco River, MG, Brazil, based on the analysis of geological, declivity, hypsometric, knickpoints maps and sampling of the regolith material from a slope/gully of each group. The results of the Principal Component Analysis (PCA) of the physical (granulometry) and chemical parameters (pH - H₂O/ KCl), electrical conductivity, organic matter, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²O₃, Al²O₃, and TiO₂) of the regoliths, as well as the maps, indicate the existence of lithostructural controls on the occurrence of steep breaks of slopes, associated with the acceleration of surface runoff flows, favoring gullying in specific areas of the basin. The PCA made it possible to compare the regolith parameters of the five slopes/gullies, showing that the first principal component (PC1), related to silt, and PC2, to coarse sand, account for 45% of

the total variance of physical and chemical parameters. The PCA biplot graphs indicate that there is heterogeneity in these parameters, meaning that there are variations between the physical and chemical characteristics between the five slopes/gullies, suggesting that they do not directly account for the grouping of the gullies.

Keywords: Gully clusters; Slopes; Regolith; Physical and chemical properties; Principal Component Analysis.

1. Introdução

Voçorocas são feições erosivas lineares formadas a partir de intensa retirada de material intemperizado das vertentes pela ação de processos complexos (AUGUSTIN, 1995; RĂDOANE; RĂDOANE, 2017; VALENTIN; POESEN; LI, 2005). A grande quantidade de sedimentos gerados, uma das características do processo de voçorocamento, causa degradação ambiental pela perda de terra agricultável e pelo assoreamento de corpos de água em várias partes do mundo, com impacto, entre outros, na produção de alimentos e na sustentação de ecossistemas diversificados (CASTILLO; GÓMEZ, 2016; HEEDE, 1976; GOMEZ et al., 2003; MARTÍNEZ-CASASNOVAS; AN-TÓN-FERNÁNDEZ; RAMOS, 2003; POESEN et al., 2003; SIDLE et al., 2019; TEBEBU et al., 2010; WEAVER; HAGANS; POPENOE, 1995).

Esse é o caso da bacia do rio Pandeiros, localizada no médio rio São Francisco, MG, Brasil, onde a presença de um número elevado de voçorocas (CETEC, 1981), algumas das quais atingindo até 1.300 m de comprimento, 40 m de largura e 40 m de profundidade (LIMA; AUGUSTIN; OLIVEIRA, 2019), tem gerado impacto ambiental em toda a bacia, conforme apontam Bandeira et al. (2018). O impacto é decorrente da retirada e transporte dos sedimentos em quantidades acima da capacidade do sistema fluvial de transportá-los, causando deposição e consequente assoreamento dos corpos de água da bacia, contribuindo para o assoreamento dos canais fluviais e de áreas úmidas, como o denominado Pantanal Mineiro (AUGUSTIN et al., 2020; BANDEIRA et al., 2018; CHAGAS et al., 2022; LIMA; AUGUSTIN; OLIVEIRA, 2019; OLIVEIRA, 2019), responsável por cerca de 70% da reprodução da ictiofauna no médio São Francisco (BETHONICO, 2009a, 2009b; CETEC, 1981; FROTA, 2013; OLIVEIRA, 2019).

Um dos aspectos distintos das voçorocas na bacia é que elas ocorrem em grupos (*clusters*) bem definidos na paisagem, sugerindo a influência de fatores locais comuns, como os reportados em áreas estudadas por Bergonse e Reis (2011) e Martins et al. (2022). Esse fato levou à busca de possíveis fatores responsáveis pelo agrupamento, uma vez que àqueles de caráter geral, como substrato rochoso, pluviosidade, cobertura vegetal e uso e ocupação da terra, são comuns à toda a bacia. O objetivo deste trabalho é o de entender o porquê e identificar possíveis causas desse tipo de distribuição, de maneira a contribuir para um melhor entendimento do processo de voçorocamento na área de estudo.

A abordagem geomorfológica adotada tem como base dois conjuntos de características intrínsecas às vertentes: 1) elementos da geologia (litoestrutura) e do relevo (ex.: altitude, declividade e rupturas de declive), que funcionam como: (i) “impulsionadores” da eficiência erosiva do escoamento superficial, como postulado por Young (1972), Wright (1973), Weiss (2001) e, (ii) respostas aos processos geomorfológicos responsáveis pela desnudação e exposição das rochas do substrato rochoso; 2) elementos da subsuperfície, como características dos regolitos, com ênfase na análise de suas variáveis físicas e químicas e sua relação com a litoestrutura e com o modelado do relevo.

Para Carson e Kirkby (1975) e Weiss (2001), a vertente deve ser estudada como a moldura natural na qual a dinâmica geomorfológica se processa, uma vez que influencia vários fatores desta dinâmica, entre elas, a balança hidrológica, o que possibilita a compreensão do contexto no qual os processos geradores das voçorocas se dão. Nessa perspectiva, os desníveis altimétricos da bacia e as rupturas de declive das vertentes constituem variáveis importantes na análise de ocorrência dessas formas erosivas, uma vez que elas se encontram intrinsecamente associadas ao potencial erosivo das encostas (AUGUSTIN, 1995).

Não menos importantes, são as características dos materiais da subsuperfície representados pelas propriedades físicas e químicas do regolito (BRYAN, 2000; DANIELS; HAMMER, 1992; CHIKWELU; OGBUAGU, 2014; GOMES et al., 2020, 2021). Crouch e Blong (1989), por exemplo, ressaltam a associação entre as características externas e internas das vertentes, ao afirmarem que as maneiras como a erosão das voçorocas ocorrem são modificadas em especial pela ação da gravidade sobre a água de escoamento de chuva (*runoff*), produzindo respostas diferentes, que dependem das características físicas e químicas dos materiais da vertente, que lhes confere grande dinamismo.

Young (1972) e Gomes et al. (2021) também apontam a importância da caracterização dos regolitos na análise dos perfis ao longo de topossequências, uma vez que, a partir delas, é possível inferir sobre os principais processos de modelagem da vertente, auxiliando na compreensão da relação entre os regolitos (ou geocoberturas) e a

dinâmica geomorfológica. As vertentes podem, assim, apresentar evidências de sua história evolutiva, ou seja, dos processos ocorridos no passado, oferecendo base analítica sobre que fatores e elementos podem estar associados aos processos envolvidos no modelado do relevo no presente, incluindo o voçorocamento (AUGUSTIN, 1995; AUGUSTIN et al., 2014; MESSIAS-MARTINS et al., 2013; YOUNG, 1972).

O termo *regolito* é aqui utilizado no sentido proposto por Scott e Pain (2008), Monkhouse e Small (1978), Taylor e Eggleton (2001) e, mais recentemente, por Caruso et al. (2018), para identificar todo o material encontrado entre a rocha sã e a superfície da vertente, incluindo o solo pedológico. Segundo esses autores, o *regolito* é formado pelo manto de material residual já desintegrado ou em processo de desintegração das rochas (*in situ*), ou seja, o *elúvio*, bem como o depósito de material coluvial e aluvial, assim como o de cinzas vulcânicas, *loess*, areia depositada pelo vento e turfas. No presente trabalho, não foram levados em consideração os aspectos genéticos e/ou edáficos do material dos perfis, embora se tenha observado características geradas pela pedogênese, como por exemplo, a distinção entre horizontes para fins de descrição e de amostragem do material e sua caracterização física e química em laboratório, sem que se tenha priorizado a identificação para fins de classificação do tipo de solo. É ainda importante ressaltar que a presente abordagem se justifica pelo fato de que, mesmo em estudos da gênese e evolução das voçorocas, a literatura aponta mecanismos de processos subsuperficiais que não estão, necessariamente, vinculados às características solo pedológico, como o do *piping* e a ação dos níveis freáticos, ocorrendo a vários metros de profundidade, em zonas de intemperismo da rocha (BRADFORD; PIEST, 1985; AUGUSTIN, 1979; 1995; AUGUSTIN; ARANHA, 2006; HANCOCK; EVANS, 2006; JONES, 1971)..

2. Área de Estudo

A área de estudo faz parte da bacia hidrográfica do rio Pandeiros, localizada no norte de Minas Gerais, correspondente também a Área de Preservação Ambiental – APA criada através da Lei estadual 11.901 de 01/09/1995, abrangendo os Municípios de Bonito de Minas, Januária e Cônego Marinho. A bacia estende-se entre as coordenadas 15° 0' 00" S e 15° 43' 00" S e 44° 30' 00" W e 45° 28' 00" W, totalizando aproximadamente 3.960,37 km² (Figura 1).

A vegetação da região é formada por espécies de transição entre o Cerrado e a Caatinga e suas variações, ou seja, pertencente a biomas marcados pelo déficit hídrico significativo em parte do ano hidrológico na estação seca, correspondente ao inverno (IBGE, 2004 a, b). O clima é classificado como Aw, correspondente ao tropical quente, segundo a classificação de Köppen, com uma precipitação média anual de 826,5 mm e déficit hídrico concentrado entre abril e setembro, com temperatura média anual de 24,2° C (MOURA; JARDIM, 2017).

O substrato geológico da bacia, de acordo com mapas da CODEMIG-UFMG (2015), é constituído por rochas sedimentares predominantemente siliciclásticas, cretáceas, do Grupo Urucuia, da bacia sedimentar Sanfranciscana. Esse grupo é caracterizado por arenitos quartzosos, avermelhados e brancos, de granulação fina a média, com grãos arredondados, bem selecionados e escassa matriz argilosa, pontualmente recobertas por depósitos terciário-quaternários (CAMPOS; DARDENNE, 1997). As rochas do Grupo Urucuia repousam, em grande parte da bacia, sobre às pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí, do Neoproterozoico, que, por sua vez, recobrem o granito-gnaiss do embasamento cristalino (Complexo Januária).

A porção mais elevada da bacia é formada por planalto levemente ondulado (0-2°) esculpido em arenitos da Fm Serra das Araras, e por relevo ondulado (2-10°), também modelado em arenitos do domínio da Fm Posse, que ocupa a maior parte da bacia, ambas do Grupo Urucuia (AUGUSTIN et al., 2020). O contato entre as duas formações é marcado por rupturas acentuadas de declive que podem atingir inclinações acima de 56°. A baixa porção da bacia é formada por extensas planícies (*poljes*) interrompidas por afloramentos de rochas carbonáticas e metapelíticas do Grupo Bambuí e pela área úmida do Pantanal do rio Pandeiros, periodicamente inundada pelas águas do próprio rio Pandeiros e pelas do rio São Francisco, do qual o Pandeiros é afluente, bem como por terraços fluviais (AUGUSTIN et al., 2022a; 2022b; OLIVEIRA, 2019; 2022). Ainda são encontrados afloramentos de rochas granito-gnaissicas em fundos de vales de alguns afluentes da margem esquerda do rio Pandeiros, como nos altos cursos do córrego Catolé e do riacho Borrachudo.

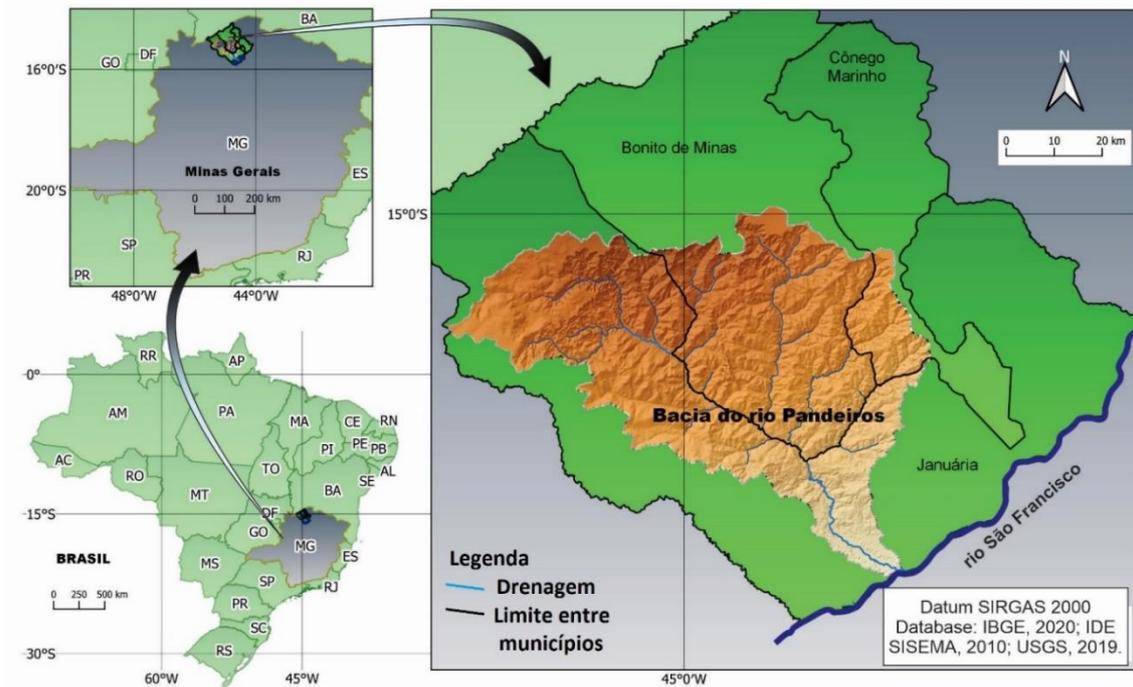


Figura 1. Localização da bacia do rio Pandeiros, MG e os municípios que abrange. Fonte: Chagas et al. (2022), modificado pelos autores.

As classes de solos drenados, dominantes na bacia, estão classificadas em Latossolos Vermelho-Amarelos, distróficos com textura média e Neossolos Quartzarênicos Órticos que ocupam a maior parte da bacia, secundados por Latossolos Vermelho-Amarelo de textura argilosa. Em menor ocorrência na bacia, localizada na ruptura de declive do front de dissecação da chapada, existem áreas com solos classificados como Neossolos Quartzarênicos órticos, Cambissolos Háplicos distróficos e Neossolo Litólico distrófico (UFV; CETEC; UFV; FEAM, 2007).

Em Associação com a ocorrência de áreas úmidas na bacia estão os solos predominantemente hidromórficos, classificados em representado por Gleissolos Melânico distróficos, nas áreas de alto curso dos afluentes do rio Pandeiros. No canal principal do rio Pandeiros e baixo curso de alguns afluentes, foram classificados mapeados os Neossolos Flúvicos, eutróficos, Gleissolos Melânicos distróficos e Gleissolos Háplicos distróficos. Na área do Pantanal do rio Pandeiros foram classificados são encontrados os Neossolos Flúvicos eutróficos, Cambissolos Háplicos eutróficos e Planossolos Háplicos eutróficos (UFV; CETEC; UFV; FEAM, 2007).

3. Materiais e Métodos

3.1 Base cartográfica

Na realização deste estudo foram utilizados os seguintes mapas: i) Mapa Geológico na escala 1: 100.000, elaborado a partir da base cartográfica do Mapa Estadual de Geodiversidade de Minas Gerais (CPRM, 2010), escala de 1: 1.000.000, com o uso de software de SIG, permitindo um recorte da base cartográfica a partir do limite da bacia (OLIVEIRA; AUGUSTIN; FONSECA, 2017). Mais tarde, ele foi reconfigurado, utilizando-se como base os mapas geológicos da CODEMIG-UFMG (2015), na escala 1: 100.000, das folhas: São Joaquim - SD.23-Y-D-III; Catolé - SD.23-Z-C-I; Januária - SD.23-Z-C-II; São Francisco - SD.23-Z-C-IV e Folha São João da Ponte - SD.23-Z-C-V, com apoio de observações de campo e análise de imagens Google Earth Pro (dezembro/2019); ii) Mapa de Declividade, de Hipsometria e de *knickpoints*. O Mapa de Declividade, assim como o de Hipsometria, teve como base o modelo digital de elevação SRTM, com dados obtidos no Projeto Topodata (IDE-SISEMA, INPE, 2017) (quadrantes: 15S45, 15S465, 14S45 E 14S465), seguindo metodologia de Fonseca (2010) e Fonseca e Augustin (2011). Os valores de declividade foram interpolados usando a densidade de Kernel, com raio de busca de 1.128 m. O Mapa de Hipsometria, também utilizado para a obtenção do perfil longitudinal, apresenta classes que foram divididas conforme critério de quebras naturais dos dados numéricos de altimetria do relevo. O Mapa de *knickpoints* foi gerado segundo

metodologia de descrita em Queiroz, Salamuni e Nascimento (2015), com base no SRTM/Topodata (INPE, 2011). O mapa de solos é da UFV; CETEC; UFV; FEAM (2007).

Para o mapeamento das voçorocas na bacia do rio Pandeiros foram utilizadas ortofotos na escala 1: 60.000 da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, 1969) e imagens do Google Earth Pro (2019) para atualização. Com o objetivo de entender os fatores associados à ocorrência e espacialização das voçorocas, foram amostradas 5 delas entre as 215 mapeadas, escolhidas aleatoriamente, uma em cada um dos *clusters* mapeados. Para a escolha, foram levados em consideração: comprimento médio de 400 m, por este representar o tamanho mais frequente desta forma erosiva e a acessibilidade para a amostragem. As cinco escolhidas foram mapeadas com drone Phantom IV e denominadas de: 1) Igrejinha 2) Cabeceirinhas, 3) Várzea, 4) Mandim, e 5) Campos, em função da proximidade de cada uma com as denominações dos locais próximos de onde ocorrem (Figura 2).

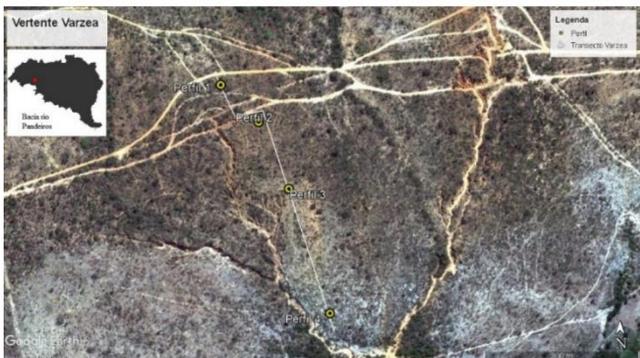
1) Voçoroca Igrejinha



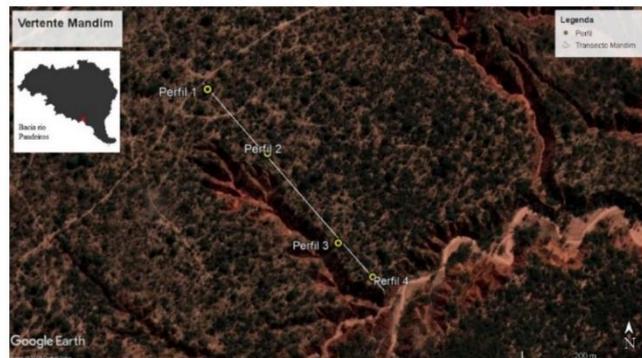
2) Voçoroca Cabeceirinhas



3) Voçoroca Várzea



4) Voçoroca Mandim



5) Voçoroca Campos



Figura 2. Imagens de drone (Phantom IV) das cinco voçorocas estudadas, com suas respectivas coordenadas geográficas e quantidade de perfis amostrados por vertente/voçoroca. Fonte: Augustin et al. (2020), modificado pelos autores.

3.2. Amostragem de campo

A amostragem geomorfológica, como indicada por Young (1972), Gardiner e Dackombe (1983), Goudie (1981) e Pain (2008), foi conduzida nas vertentes/voçorocas das porções topograficamente mais elevadas para as menos elevadas da bacia de drenagem. Seguindo procedimentos propostos por Christian e Stewart, (1968) e Wright (1973), adaptados por Augustin (1979), foi realizado um transecto do topo até a base de cada uma das cinco vertentes com voçorocas, ao longo do qual foram medidos o azimute e, com o auxílio de três balizas de 2 m alinhadas a distâncias regulares de 20 m, utilizando um clinômetro de leitura direta *Suunto*, a declividade.

Para a identificação dos pontos das trincheiras para coleta de amostras dos regolitos em cada uma das cinco voçorocas, foram previamente obtidas as coordenadas geográficas de cada um deles com o auxílio de aparelho receptor *Global Positioning System* (GPS), permitindo, no futuro, que sejam encontrados e novamente analisados. As medidas de declividade (em graus) possibilitaram obter a inclinação do perfil topográfico e, a partir destas medidas, a identificação dos Sítios Geomorfológicos (SG), definidos por Augustin (1995) como “unidades da vertente que morfologicamente apresentam uniformidade interna, e são externamente delimitadas por discontinuidades de gradientes”, garantindo, com isto, a compartimentação das vertentes em unidades homogêneas, passíveis de serem mapeadas. Na porção central de cada sítio (Figura 2), foi aberta uma trincheira com até 2 metros de profundidade para descrições morfológicas e coleta de amostra do material regolítico, uma em cada horizonte, por perfil, para análises química e física laboratoriais. A descrição dos perfis e a coleta das amostras seguiram metodologia proposta por Lemos et al. (2013), e por Pain (2008, p. 39) que considera o solo como “a porção superior do regolito organicamente afetada”.

No total, foram coletadas amostras de 81 horizontes de 22 perfis de regolitos de 5 vertentes com a presença de voçorocas (Tabela 1), cada uma delas, localizada em um dos 5 grupos (*clusters*). A amostragem com base na identificação dos SG permitiu que mesmo levando em consideração apenas os valores médios dos atributos de cada vertente/voçoroca, estes sejam mais representativos das variações dos atributos (externo à vertente) e dos regolitos (internas da vertente). Sem a identificação do SG, as médias das vertentes/voçorocas poderiam representar somente as características e um ponto amostral da vertente/voçoroca. As amostras foram encaminhadas para análise dos parâmetros físicos e químicos no Laboratório de Geomorfologia e Recursos Hídricos, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal de Minas Gerais.

Tabela 1. Localização das amostras.

Transecto	Perfil	Latitude (S)	Longitude (O)	Horizontes amostrados
1) Igrejinha	1	15° 5'1,17"	45°13'41,08"	4
	2	15° 5'1,54"	45°13'40,49"	4
	3	15° 5'3,10"	45°13'38,92"	4
	4	15° 5'4,05"	45°13'38,29"	4
2) Cabeceirinhas	1	15°10'43,94"	45° 6'50,11"	6
	2	15°10'41,38"	45° 6'49,39"	3
	3	15°10'38,42"	45° 6'48,06"	3
	4	15°10'34,43"	45° 6'46,22"	4
3) Várzea	1	15°14'37,21"	45°11'39,62"	4
	2	15°14'39,29"	45°11'37,43"	4
	3	15°14'43,21"	45°11'35,64"	4
	4	15°14'50,83"	45°11'33,10"	3
4) Mandim	1	15°29'38,54"	44°50'30,64"	3
	2	15°29'41,48"	44°50'27,87"	3
	3	15°29'45,89"	44°50'24,37"	3
	4	15°29'47,68"	44°50'22,56"	3
5) Campos	1	15°34'7,36"	44°41'40,45"	4
	2	15°34'6,23"	44°41'41,76"	4
	3	15°34'6,40"	44°41'44,70"	4
	4	15°34'5,17"	44°41'46,69"	4
	5	15°34'2,14"	44°41'49,77"	3

3.3. Análises laboratoriais

As análises granulométricas e químicas seguiram métodos descritos por Donagema et al. (2003), Teixeira et al. (2017), Machado, Bernardi e por Santos (2003). Na análise granulométrica (areia grossa, areia fina, silte e argila) foi usado o método peneira-pipeta com dispersante NaOH (0,1 mol.L⁻¹); pH (em H₂O, em KCl) determinado por potenciometria na suspensão do material regolítico-água (1:2,5 em H₂O; KCl 1 mol L⁻¹; condutividade elétrica (CE) pelo método condutimétrico (eletrodo combinado, KCl 1 mol L⁻¹) a 25°C (solução padrão de condutividade elétrica de 1413 µS/cm); carbono orgânico (CO) pela metodologia de oxidação com dicromato de potássio (WALKEYBLACK, 1934; macronutrientes (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺), no qual o cálcio e o magnésio são extraído por meio da solução 1M de KCl titulados com EDTA, o sódio e potássio, por fotômetro de chama e os óxidos (Fe₂O₃, TiO₂ e Al₂O₃) pela extração sulfúrica. Os resultados das análises de maneira sumarizada estão contidos na Tabela 2, da qual constam a média dos valores dos parâmetros medidos por ponto/trincheira/perfil/, exceto para os valores de sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) que obtiveram o valor zero em todas as amostras. Para a identificação da cor em amostras úmidas, foi usado o Munsell Color Chart (2000).

3.4. Tratamento Estatístico

Foi utilizado o teste estatístico de Análise dos Componentes Principais (ACP) para comparar e correlacionar os 13 (treze) parâmetros físicos e químicos dos regolitos das vertentes/voçorocas. Segundo Moore (1993), a ACP é instrumento importante, em especial quando se lida com muitas variáveis, auxiliando a entender a relação entre os diversos atributos estudados, a identificar possíveis semelhanças (similaridade) e a interdependência entre eles, permitindo examinar suas relações, compará-los entre si e, assim, agrupá-los, como é o caso dos dados desta pesquisa. Para isto, todos os parâmetros tiveram seus valores convertidos para a mesma escala através da função matemática logaritmo na base 10, possibilitando a comparação de todos na mesma escala. A ACP foi conduzida no programa PAST (nhm.uio.no/english/research/resources/past), versão 4.13, mostrando a síntese de dados representando situações e ambientes complexos usando dois dos principais componentes.

4. Resultados

4.1 Análise dos mapas

Foram identificadas através de ortofotos da CEMIG (1969) corrigidas com imagens do Google Earth Pro (2019), o total de 215 voçorocas, cuja distribuição espacial na bacia não é homogênea, formando 5 grandes grupos, ou *clusters*. Para a análise e contextualização dos fatores geológicos, geomorfológicos e solos, tomou-se como referência: (i) no mapa geológico, elementos da litoestrutura e, (ii) nos mapas de hipsometria, declividade e *knickpoints*, além de um perfil longitudinal da bacia, elementos do relevo (altimetria, declividade, rupturas de declive), para identificar a relação entre eles e a distribuição em grupos das vertentes/voçorocas na bacia do rio Pandeiros. Os elementos do relevo têm papel fundamental na geração de energia potencial, uma vez que o desnível altimétrico e a inclinação (declividade) das vertentes, levam à variação na distribuição desta energia na bacia. Eles também atuam sobre o comportamento da água superficial, afetando a quantidade e velocidade do escoamento, com ação direta sobre a infiltração, a ação erosiva, a exposição do substrato rochoso, o transporte e distribuição de sedimentos, e, assim, no desenvolvimento dos regolitos, incluindo os solos, com impacto na diversificação dos habitats (AUGUSTIN, 1995; MESSIAS-MARTINS et al., 2013; WEISS, 2001). A análise de mapas que os representam permite, portanto, uma contextualização importante sobre a distribuição das voçorocas na bacia do rio Pandeiros.

4.1.1. Mapas da localização das voçorocas e de classes de declividade

O mapa 1 (Figura 3A) da drenagem e localização dos grupos I, II, III, IV, V de ocorrência da maioria das voçorocas na bacia do Pandeiros mostra que, além delas não se encontrarem homogeneamente distribuídas, os três primeiros grupos (I, II e III) estão localizados na porção mais a noroeste, próxima às cabeceiras do rio Pandeiros, enquanto os IV e V ocorrem na baixa porção da bacia.

Como pode ser observado no segundo mapa das classes de declividades (Figura 3B), as áreas onde os grupos de voçorocas ocorrem são caracterizadas por declives mais acentuados, do que os do entorno. As classes com maiores valores (20,01 a 56°) estão situadas nas áreas de contato da Fm Serra das Araras com a Fm Posse, formando um semiarco em torno da porção NW, N e NE da bacia. Também estão presentes em áreas de relevo reliquiar, como na margem esquerda do rio, na porção média da bacia. Da mesma maneira, é interessante notar que todos os grupos ocorrem preferencialmente na margem esquerda do rio Pandeiros, que tem classes de declividades, em médias, menos elevadas (0-10°).

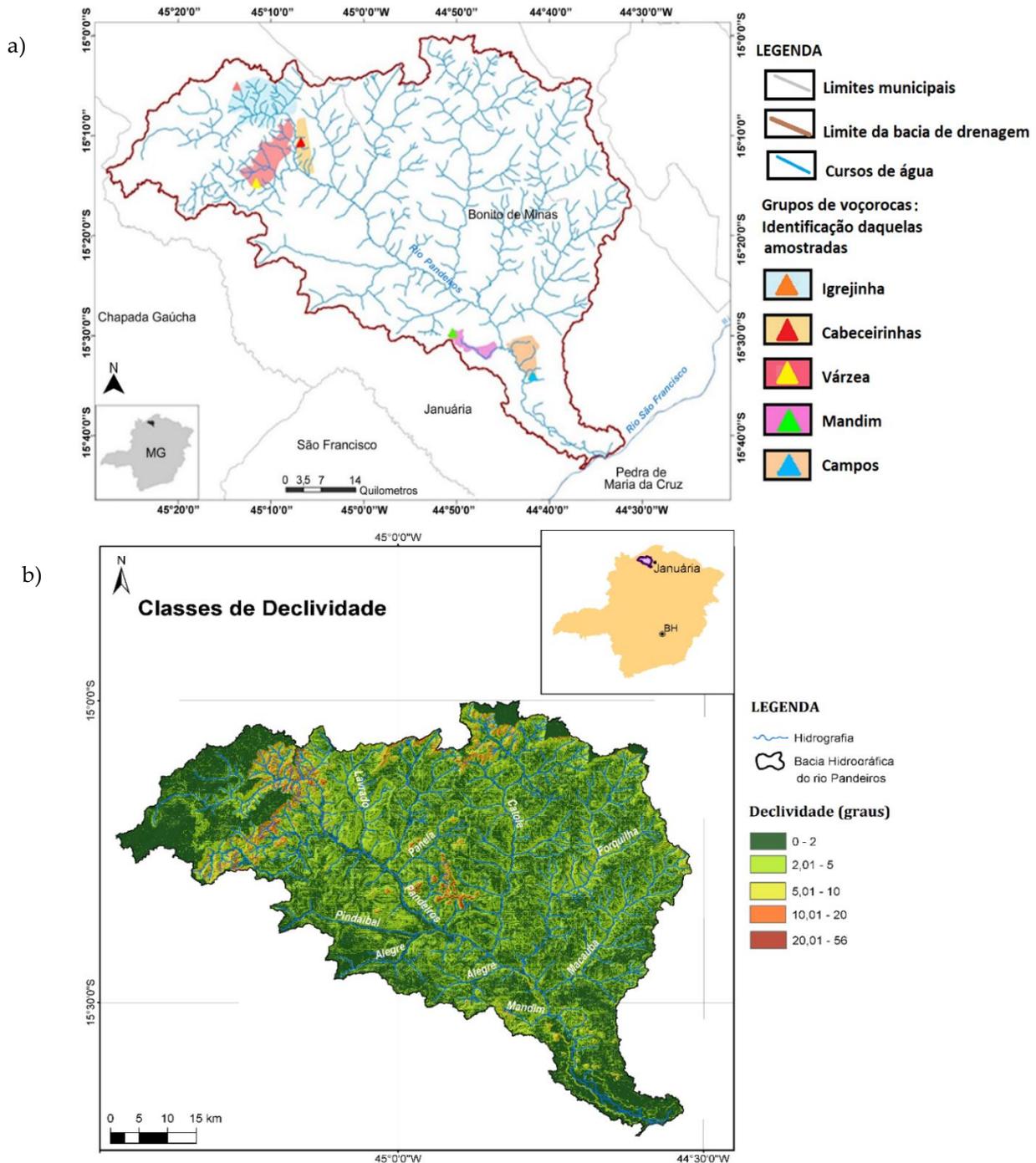


Figura 3. a) Mapa de drenagem da bacia do rio Pandeiros, MG, com a localização das áreas com voçorocas mostrando que estas ocorrem em grupos espacialmente descontínuos, sendo três (I, II, III) na alta porção bacia e dois (IV; V) na baixa porção. b) O mapa de classe de declividade indica que as três primeiras zonas coincidem com as classes de valores mais elevados. Fonte: Augustin et al. (2020), modificados pelos autores.

É possível associar, levando em consideração a localização das vertentes/voçorocas I, II e III (Figura 3A) presentes em zonas de cabeceiras do rio Pandeiros topograficamente mais elevadas, aos valores mais acentuados das classes de declividades (Figura 3B). No entanto, não foram identificadas (e mapeadas) voçorocas em outras áreas também topograficamente elevadas, presentes nos contatos geológicos do entorno da bacia, em seus limites com as dos rios Cochá e Peruaçu, embora estas também apresentem classes de declividade altas. Da mesma maneira, os grupos IV e V não estão localizadas em áreas com declives especificamente elevados (5 a 20°, respectivamente) se comparadas com áreas próximas. Esse fato permite assumir que, na área de estudo, a declividade não constitui, sozinha, fator determinante na localização das voçorocas.

4.1.2. Mapa de *knickpoints*

Os grupos das voçorocas também foram plotados no mapa de *knickpoints* (Figura 4), que representa a distribuição espacial das inclinações das vertentes na bacia. As cores vermelhas e amarelas marcam as áreas com rupturas mais acentuadas, indicando onde a energia erosiva potencial é mais elevada. São áreas, portanto, mais suscetíveis aos processos erosivos associados à ação da água, entre eles, o voçorocamento.

Como pode ser observado, os cinco grupos de vertentes/voçorocas, tanto os topograficamente mais elevados (I, II, III), como os da baixa porção da bacia (IV, V), têm sua localização em rupturas acentuadas de declive, sugerindo uma relação entre a localização do agrupamento das voçorocas e a presença destas rupturas de declive identificadas no mapa da figura 4.

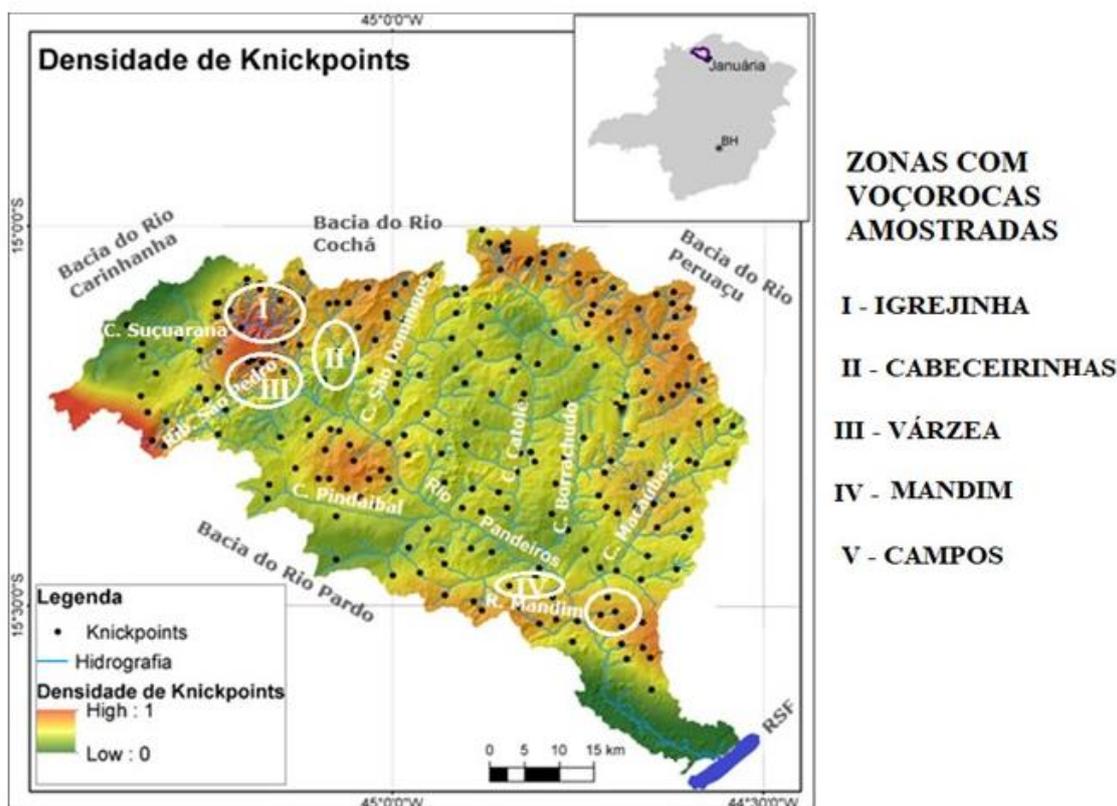


Figura 4. Mapa de *knickpoints* mostrando: as áreas de rupturas de declive, sendo as mais acentuadas as das cores vermelha, alaranjada e amarela; e a localização dos grupos (ou zonas) de concentração de voçorocas (I, II, III, IV, V) na bacia do rio Pandeiros-MG. Fonte: Augustin et al. (2020; 2023b), modificado pelos autores.

4.1.3. Mapa geológico simplificado

Os grupos de voçorocas também foram plotados no mapa geológico (Figura 5) permitindo associar sua localização nas grandes rupturas, aos contatos litoestruturais resultantes da evolução geológica da bacia expostos pelos processos de elaboração do relevo. A primeira ruptura ocorre no contato das duas formações que compõem o Grupo Urucuia, sendo a do topo estratigráfico (e topográfico), a Fm. Serra das Araras, composta por arenitos

quartzosos, argilitos e conglomerados, com coloração avermelhada pela presença de óxidos de ferro, sobre os quais ainda ocorrem horizontes pelíticos, também vermelhos, e muito oxidados. As rochas dessa formação são resultantes de sedimentação fluvial no Cretáceo Superior, em ambiente mais úmido do que o dominante durante a deposição dos sedimentos que deram origem à segunda formação, da base, denominada de Posse, caracterizado por clima desértico (CAMPOS; DARDENNE, 1997). Nela predominam arenitos depositados em estratificações cruzadas de grande porte, em ambiente predominantemente eólico, ou seja, dunas (CODEMIG-UFMG, 2015). Esses autores (1997) separam a Fm Posse em duas fácies distintas: a 1, da base e a 2, do topo, através de variações granulométricas, e mesmo de composição mineralógica, o que pode influenciar os resultados tanto físicos, como químicos da composição do regolito das voçorocas estudadas.

A outra área de contato litoestrutural é identificada na baixa porção da bacia do Pandeiros, onde afloram rochas metapelíticas e carbonáticas do segundo grupo geológico presente, as o Grupo Bambuí, do Neoproterozoico (Figura 5), cujas características litoestruturais também podem afetar àquelas dos regolitos amostrados, por apresentarem mudanças granulométricas, com a presença de sedimentos de diâmetros mais finos, e químicas, com maiores teores de cálcio e magnésio, típicos desse tipo de litologia.

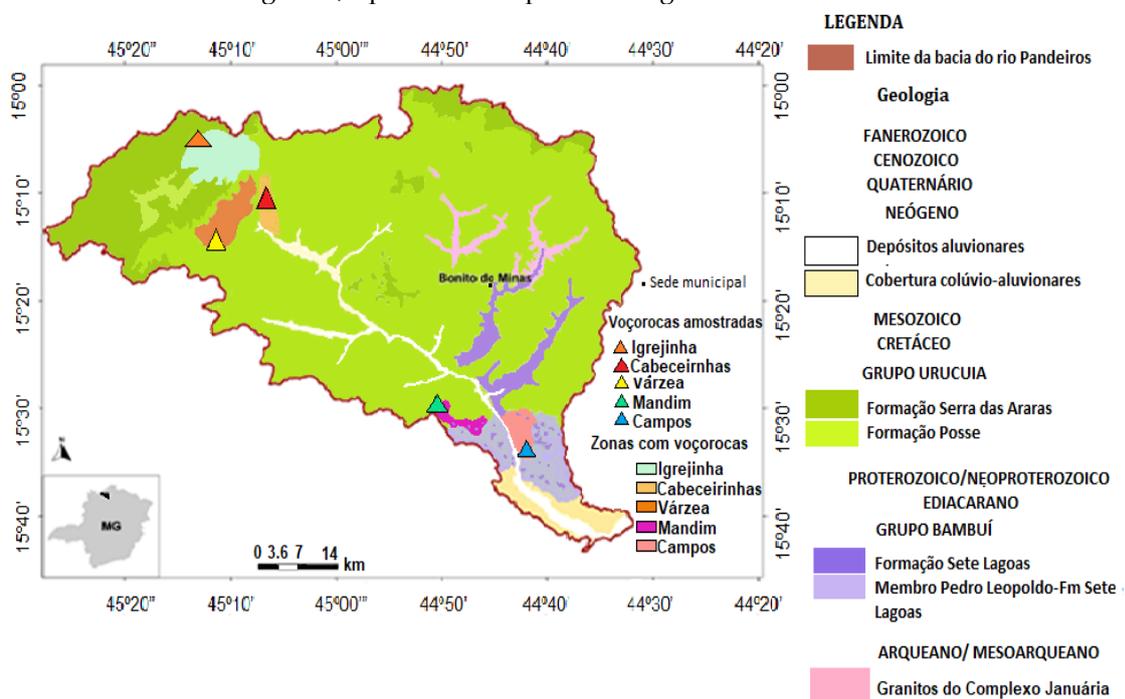


Figura 5. Mapa geológico simplificado da bacia do rio Pandeiros -MG, com a localização dos grupos das voçorocas, mostrado por cores e símbolos diferenciados, e das vertentes/voçorocas, representadas por triângulos com cores variadas, cujos regolitos foram analisados. Fonte: Mapa Geológico CODEMIG-UFMG, 2015, modificado pelos autores.

4.1.4. Mapa hipsométrico e perfil longitudinal

Buscando aprofundar o entendimento da relação entre os elementos do fator geológico (litologia e estrutura), do fator geomorfológico (altimetria, declividade, rupturas de declive e formas de relevo) com o agrupamento das voçorocas na bacia, a localização das mesmas foi também plotada no mapa hipsométrico (Figura 6I), complementada com um perfil topográfico longitudinal ao longo do rio Pandeiro (Figura 6II). O mapa mostra que as vertentes/voçorocas se encontram distribuídas em 3 zonas (I, II, III) de rupturas de declive acentuadas, que separam 4 outras de relevo mais regular, configurando patamares (1, 2, 3 e 4) que abrangem toda a bacia (Figura 6I). É possível perceber que as rupturas com valores mais significativos ocorrem justamente em áreas de contato litoestratigráfico (Figura 5), sendo: Igrejinha (I) na borda da chapada formada em rochas da FM Serra das Araras, e a Fm Posse (Grupo Urucuia), em ruptura que separa os patamares 1 e 2 (Figura 6), enquanto Cabeceirinhas (II) e Várzea (III), na ruptura entre os patamares 2 e 3 da Fm Posse (700-600 m). Da mesma maneira, as vertentes/voçorocas do

Mandim (IV) e de Campos (V), da porção baixa da bacia, na ruptura de declive (patamar 4), que marca o contato entre a Fm Posse e as rochas metapelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí, em altitudes mais baixas (600 e 550 m).

Embora o mapa de *knickpoints* (Figura 4) e o geológico (Figura 5) tenham evidenciado essa associação (contatos geológicos e rupturas acentuadas de declive), o mapa hipsométrico e o perfil longitudinal (Figura 6) mostram que a localização dos grupos de voçorocas não se encontra aleatoriamente distribuída em todas as áreas de rupturas de declive, mas sim concentrando-se naquelas ao longo do eixo longitudinal da bacia. Esse fato sugere influência da dinâmica de encaixamento da rede de drenagem possivelmente associada às mudanças de nível de base do rio, seja por agentes antrópicos ou naturais. O mesmo foi constatado por Augustin et al. (2020) em estudos conduzidos na bacia do rio Pandeiros, que apontaram para a existência de dois eixos topográficos influenciando a distribuição geral da energia potencial do escoamento superficial da água de chuva na bacia: 1) longitudinal, da porção mais elevada a NW da área de estudo, no domínio das rochas da Fm Serra das Araras, do Grupo Urucuaia, até a foz do rio Pandeiros em sua confluência com o rio São Francisco, no domínio das rochas da Fm Sete Lagoas, do Grupo Bambuí, formando um desnível de aproximadamente 250 m; 2) lateral, representado pelo avanço das cabeceiras dos afluentes do rio Pandeiros, alargando o seu vale e atingindo cerca de 60 km de extensão em sua porção média, que é a mais larga. O desnível entre os pontos mais elevados de um lado e outro da bacia varia muito em função do encaixamento da drenagem, mas podendo atingir até 350 m na margem esquerda, a mais elevada (932 m).

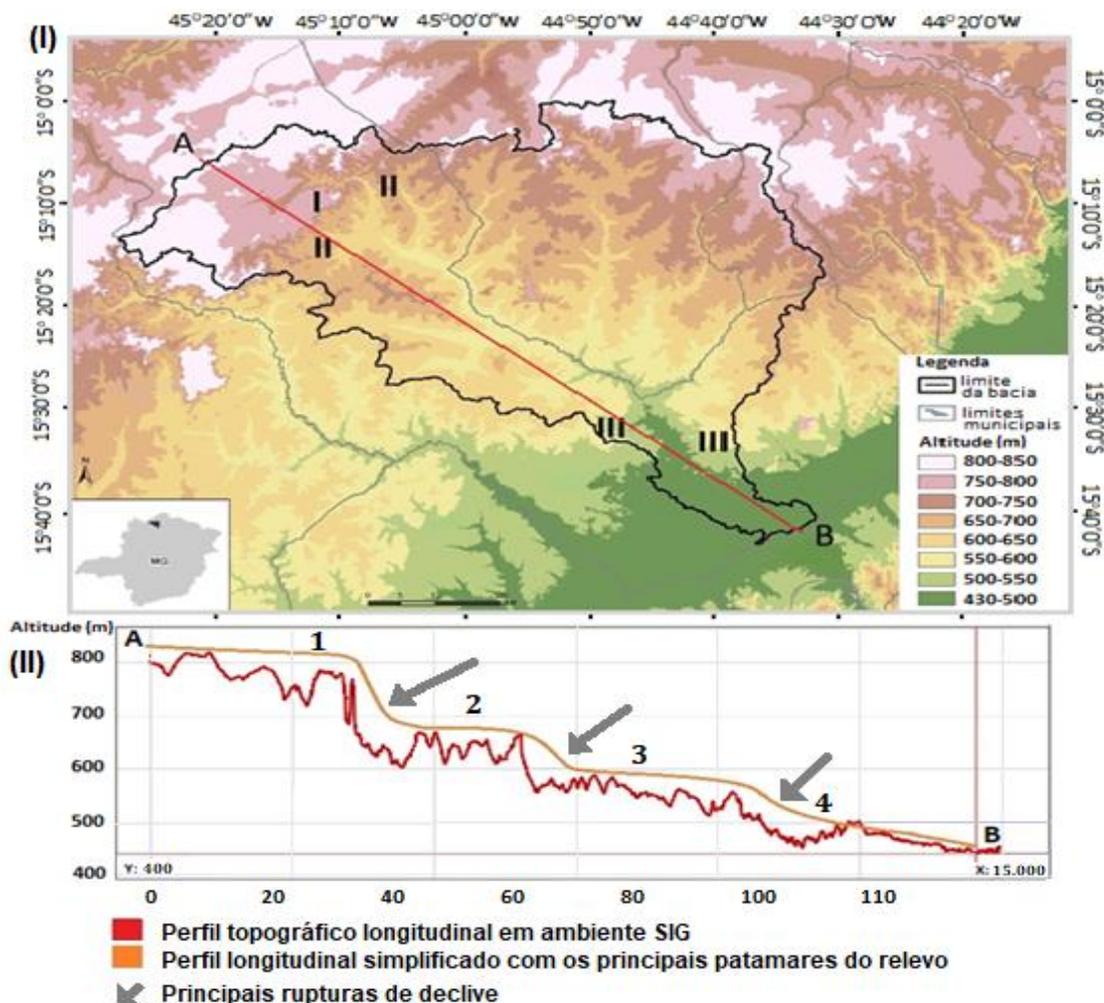


Figura 6. (I) Mapa hipsométrico da bacia do rio Pandeiros, MG, no qual foram plotados os grupos de vertentes/voçorocas (I, II, III, IV, V); abaixo do mapa hipsométrico, perfil topográfico longitudinal (II) obtido em ambiente SIG, no qual é possível estabelecer a relação entre a ocorrência dos grupos de voçorocas e as principais rupturas de declive (marcadas por setas cinza), que interrompem áreas de relevo com declividades menos acentuadas, ou seja, de patamares (1, 2, 3, 4). Não há coincidência espacial entre os pontos A e B do mapa e do perfil longitudinal.

A análise dos mapas e do perfil longitudinal indica que os agrupamentos das voçorocas se encontram localizados em áreas de contatos litoestruturais herdados da evolução geológica da bacia, expostos pelos processos geomorfológicos ao longo da evolução do relevo, criando rupturas acentuadas de declive. Evidenciou ainda que a localização dos grupos se dá, basicamente, ao longo do eixo do rio Pandeiros sugerindo que eles podem estar associados aos efeitos mais diretos da dinâmica fluvial, como ajustes do nível de base do rio, como sugerido por Augustin et al. (2020), seja por causas naturais ou antrópicas, decorrentes de tipos de uso e ocupação da terra, como a presença de estradas vicinais, queimadas e desmatamentos (LIMA, 2019; LIMA; AUGUSTIN; OLIVEIRA, 2019).

4.2. Análise dos resultados dos parâmetros físicos e químicos dos regolitos das vertentes/voçorocas

Para uma melhor compreensão da influência dos fatores relacionados às características físicas e químicas do regolito na distribuição espacial das voçorocas na bacia, foram analisados os valores médios destes atributos, por vertente/voçoroca amostrada (Tabela 2), lembrando que dois deles (K^+ e Na^+), não constam da tabela, uma vez que não foram detectados, como indicado na metodologia.

4.2.1. Parâmetros físicos

Como mostra a Tabela 2, todas as vertentes/voçorocas mostram a predominância da fração areia ($g\ kg^{-1}$), em especial a fina (682,39), sobre os demais diâmetros. Logo após, vem a areia grossa (149,86), seguida da argila (101,00) e, por último, do silte (67,60). Esses valores são característicos de solos de textura arenosa, indicando relação com a litologia do substrato rochoso da bacia, como pode ser identificada na figura 5.

Tabela 2. Valores médios dos 13 parâmetros físicos e químicos dos 81 horizontes e 22 perfis de regolitos, das 5 voçorocas amostradas, das porções topograficamente mais elevadas, para as menos elevadas da bacia, medidos em laboratório e elencados de acordo com a posição das voçorocas em seus respectivos grupos nomeados como: (1) Igrejinha; (2) Cabeceirinhas; (3) Várzea; (4) Mandim; (5) Campos, localizadas na bacia do rio Pandeiros – MG.

V	Granulometria ($g\ kg^{-1}$)				pH (H ₂ O)	pH (KCl)	CE (μS)	CO ($g\ kg^{-1}$)	Cátions trocáveis ($cmolc/dm^{-3}$)		Óxidos ($g\ kg^{-1}$)		
	AG	AF	Silte	Arg					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂
1	38,39	812,34	96,85	52,24	5,03	4,18	51,44	1,30	3,30	1,65	16,58	35,92	0,41
2	148,59	688,00	43,83	119,95	4,90	4,17	39,41	8,95	3,55	1,18	17,09	33,53	1,75
3	189,35	501,30	132,64	176,81	6,70	5,56	99,00	4,93	4,19	2,54	46,82	93,85	0,31
4	236,85	668,60	32,71	65,85	5,07	4,27	39,29	1,80	3,70	0,66	10,99	21,80	0,47
5	136,10	741,70	31,95	90,27	4,88	4,00	43,29	2,07	3,38	0,94	13,10	31,63	0,22
T	749,28	3411,90	338,00	505,12	26,60	22,20	272,43	19,05	18,12	6,97	104,58	2016,73	3,16
M	149,86	682,39	67,60	101,00	5,32	4,44	54,57	3,81	3,63	1,39	20,92	43,35	0,63

Legenda: V: voçoroca/vertente; Granulometria ($g\ kg^{-1}$): AG: Areia Grossa (2 – 0,2 mm) / AF: Areia Fina (0,2 – 0,05 mm) / Silte: (0,05 – 0,002 mm) / A: Argila (< 0,002 mm); pH (H₂O); pH (KCl); CE: Condutividade Elétrica (μS); CO: Carbono Orgânico (g/kg^{-1}); Óxidos: Ca²⁺ (Cálcio); Mg²⁺ (Magnésio); Fe₂O₃ (Ferro); Al₂O₃ (Alumínio); TiO₂ (Titânio); M: médias; T: Total. Fonte: Lima (2019b), modificado pelos autores.

Essa predominância da fração areia é verificada também com relação às médias (M) granulométricas ($g\ kg^{-1}$), dos regolitos individualizadas por cada vertente/voçoroca (Tabela 1). É o caso de Igrejinha (V1), que ocorre na escarpa do Chapadão das Gerais, a porção topograficamente mais elevada da bacia (Figura 6I), e a primeira

vertente/voçoroca a ser amostrada, apresenta, por exemplo, o maior valor (g kg^{-1}) de areia fina (812,34) da bacia, seguido do silte (96,85), o segundo mais elevado, tendo os menores valores de argila (52,24) e de areia grossa (38,39), entre as cinco voçorocas estudadas. Igrejinha encontra-se localizada na base do domínio das rochas da Fm Serra das Araras (Figura 5), do topo do Grupo Urucuia, em área com substrato formado por “arenitos finos a médios, ferruginosos, em geral lateritizados, mostrando níveis pelíticos ferruginosos” (Figura 7) remanescentes de sedimentação fluvial de planícies do Cretáceo (CAMPOS; DARDENNE, 1997; CODEMIG-UFMG, 2015). É possível, portanto, estabelecer relação entre a predominância da areia fina com o substrato rochoso depositado em condições deltaicas, o que, hoje, o individualiza esse substrato com relação aos demais.



Figura 7. Voçoroca localizada na borda da escarpa formada no contato entre as rochas da Formação Serra das Araras e Posse, ambas do Grupo Urucuia. O regolito é caracterizado pela cor vermelha, típica do substrato geológico lateritizado da Fm Serra das Araras. As paredes são instáveis, nas quais se observa deslizamentos responsáveis pelo intenso fornecimento de sedimentos para o sistema fluvial. Coordenada do local da fotografia: $15^{\circ} 05' 01,92'' \text{ S}$ e $45^{\circ} 13' 43,06'' \text{ W}$. Fotografia a esquerda visão do topo para a base. Fotografia a direita da base para o topo.

Cabeceirinhas (V2) tem uma quantidade maior (g kg^{-1}) de areia grossa (148,59), embora mostre predominância de areia fina (688) (Tabela 2). O silte, no entanto, diminui (43,83), constituindo menos da metade (45,6%) do encontrado em Igrejinha. A argila aumenta em cerca de 44% (119,95) comparada com Igrejinha, sendo a segunda quantidade mais elevada entre as voçorocas. Cabeceirinhas ocorre na base da grande ruptura de declive (escarpa) a NW da bacia (Figura 6), no domínio das rochas da Fm Posse (Figura 5) da base do Grupo Urucuia, composta basicamente de arenitos quartzíticos. No entanto, os dados granulométricos da voçoroca parecem estar associados às características da Fácies 2 desta formação, caracterizada tanto por arenitos finos, na forma de camadas detríticas, que responderiam pelo aumento de areia grossa, como de feldspatos (CAMPOS; DARDENNE, 1997), cuja alteração química parece ter contribuído para os maiores teores de argila presentes nesta voçoroca.

Várzea (V3) tem o maior valor (g kg^{-1}) de silte (176,81) e de argila (176,81), além do segundo maior de areia grossa (189,35), embora tenha o menor de areia fina (501,30), entre as voçorocas estudadas (Tabela 2). Localizada, como as duas anteriores, na alta porção da bacia (Figuras 4 e 6) encontra-se em posição mais a jusante do rio Pandeiros. Seus valores de granulometria parecem espelhar mais a composição da camada da Fácies 2 da Fm Posse, composta, segundo o Mapa Geológico Folha São Joaquim (CODEMIG-UFMG, 2015), de “arenitos feldspáticos e quartzo arenitos”, com material argiloso interpretado como matriz verdadeira associada à deposição por um

sistema fluvial entrelaçado, o que responderia pelos valores mais elevado de argila e de silte, os maiores entre as cinco voçorocas.

A voçoroca 4 (Mandim), no lado direito da baixa porção da bacia do rio Pandeiros (Figura 3), ocorre em área próxima ao contato das rochas areníticas do Grupo Urucuia (Fm. Posse) do Cretáceo Superior com as pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, do Neoproterozoico (Figura 5). Enquanto grande parte das voçorocas nessa área encontram-se ainda sobre o domínio de rochas do primeiro Grupo, a margem direita do riacho Mandim já se encontra em rochas do segundo Grupo. Seus regolitos apresentam os valores (g kg^{-1}) mais elevados de areia grossa (236,85), o terceiro de areia fina (668,60), o segundo mais baixo de silte (32,71) e o terceiro maior de argila (65,85) entre as cinco voçorocas estudadas (Tabela 2). Como no caso das demais voçorocas analisadas neste trabalho, os valores da granulometria de Mandim, demonstram associação com a variabilidade das características de composição litológica e da estrutura das camadas sedimentares da Fm. Posse e, neste caso, também da Fm. Sete Lagoas, que já faz parte do Grupo Bambuí (Figura 5). A quantidade mais elevada de areia grossa pode ser atribuída à presença de material mais resistente ao intemperismo (Figura 8), como veios de quartzo, matações silicificados, lentes e níveis conglomeráticos da Fácies 1 da Fm Posse, identificadas por Campos e Dardenne (1997), bem como aos calcarenitos da Fm. Sete Lagoas (CODEMIG-UFMG, 2015), enquanto a quantidade de areia fina é proveniente dos arenitos muito finos a finos, também da Fácies 1 da Fm. Posse. Essas rochas encontram-se expostas, como as demais analisadas, pelos processos geomorfológicos atuantes ao longo do tempo geológico, expondo as camadas sedimentares da base dos grupos geológicos, criando desníveis altimétricos e gerando energia erosiva potencial (Figura 4). Assim é que a posição da vertente/voçoroca do Mandim, no baixo curso do rio Pandeiros (Figura 3), possibilitou a exposição das rochas da base estratigráfica do substrato representado, nesta área, pelas rochas do Grupo Bambuí, que, uma vez intemperizadas, deram origem aos regolitos hoje encontrados.



Figura 8. Material proveniente dos níveis e lentes conglomeráticos, veios de quartzo e de matações silicificados da Fácies 1 da Fm Posse, Grupo Urucuia, encontrado nos regolitos e na drenagem da voçoroca de Mandim.

A voçoroca 5 (Campos), no lado esquerdo do baixo curso do rio Pandeiros, também está localizada no contato das rochas areníticas da Fm Posse, em especial as da Fácies 1, com aquelas predominantemente metapelíticas-carbonáticas da Fm. Sete Lagoas do Grupo Bambuí (Figura 5). Essa vertente/voçoroca apresenta o segundo maior valor (g kg^{-1}) de areia fina (741,70), somente abaixo de Igrejinha (V1), enquanto a areia grossa tem o segundo menor valor (136,10) entre os medidos na bacia (Tabela 2). O silte (31,95) é o mais baixo, enquanto a argila (90,27), é o terceiro mais elevado entre as voçorocas estudadas. Os valores da areia fina e silte podem ser atribuídos tanto aos arenitos finos da Fm Posse, como às intercalações de calcarenitos e calcissiltito das rochas carbonáticas da Fm Sete Lagoas (CODEMIG-UFMG, 2015). Já a areia grossa parece estar associada, como no caso de Mandim, aos seixos areníticos liberados da matriz conglomerática (Figura 8), pelo intemperismo e a erosão, enquanto a argila e mesmo o silte, aos calcilutitos da mesma formação. A argila é também encontrada em bancos de arenitos brancos argilosos como descritos no Mapa Geológico, Folha São Francisco, da CODEMIG-UFMG (2015).

A associação entre as características granulométrica e as litológicas estão também presentes no mapa de solos da bacia (Figura 9). Ele mostra a predominância da maior ocorrência dos Latossolos Vermelho-Amarelos, distróficos, de textura média, presentes nos domínios da Fm Posse, da base do Grupo Urucuia, secundados por Latossolos,

também Vermelho Amarelos distróficos, porém mais argilosos, da Fm Serra das Araras, do topo estratigráfico do mesmo grupo geológico. Em terceiro lugar, em termos de área ocupada de ocorrência, estão os Neossolos Quartzarênicos (órticos) e Neossolo Quartzarênicos (órtico) e Litólicos (distróficos), ambos de fraco a moderado, que estão presente de maneira irregular nas áreas de contato entre as rochas das duas formações acima mencionadas. Enquanto o Grupo I das vertentes/voçorocas (Igrejinha) encontra-se localizado nos Neossolos Litólicos, os II (Cabeceirinhas) e III (Várzea) ocorrem nos Latossolos Vermelho-Amarelos, tanto de textura mais argilosa, como de textura média, associados às rochas das duas formações do Grupo Urucuia. Os grupos IV (Mandim) e V (Campos), no baixo Pandeiros, têm Planossolos Háplicos eutróficos e sódicos, que podem ser associados aos domínios das rochas metapelíticas e carboníferas do Grupo Urucuia (Figuras 5 e 9).

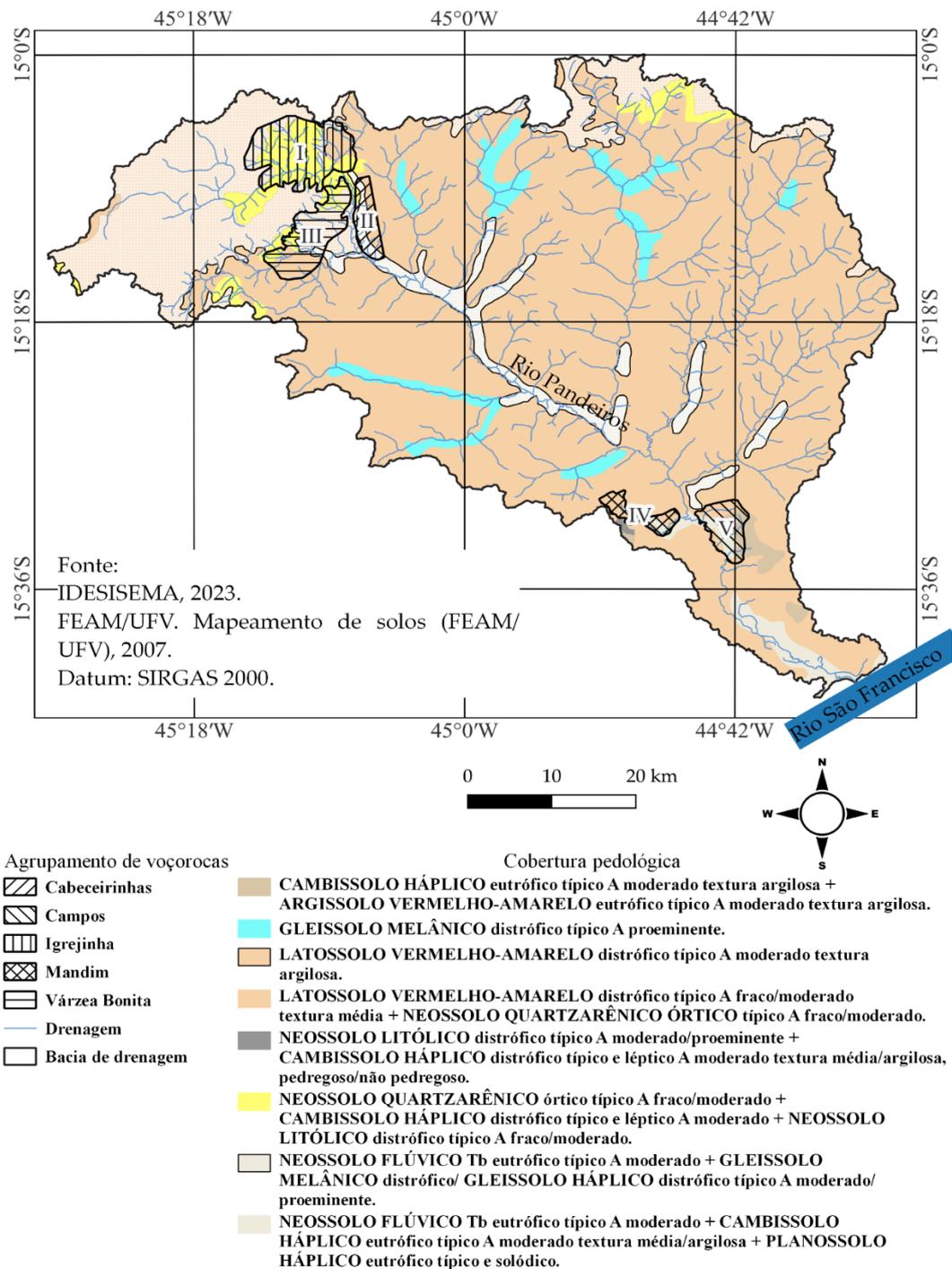


Figura 9. Mapa de classes de solos da bacia do rio Pandeiros – MG e a localização dos agrupamentos (*clusters*) das voçorocas. Fonte: FEAM/UFV (IDESISEMA, 2023).

Tendo em vista evidências da relação entre as características granulométricas e a litologia das rochas na bacia, e ainda levando em consideração a ampla distribuição dos Latossolos Vermelho-Amarelos na bacia, desenvolvidos em especial nas rochas do Grupo Urucuia, pode-se assumir que a classe de solo parece não constituir o fator mais relevante no agrupamento das voçorocas, expressando, no entanto, importante influência litológica e do relevo, tendo em vista que a exposição das rochas pela dinâmica geomorfológica tem um papel essencial na caracterização granulométrica dos regolitos.

4.2.2. Parâmetros químicos

A tabela 2 apresenta os dados das análises químicas dos regolitos das cinco voçorocas que apontam, como poderia se esperar, elementos associados à granulometria e, através desta, à litologia e à estrutura do substrato rochoso, expostos por processos geomorfológicos envolvidos na elaboração do relevo. Também podem ser correlacionados ao tipo de solo mostrados na figura 9. Indicador de acidez, o pH (H₂O) não varia em função do tipo de classe de solo (Figura 9), mas varia dependendo da localização das vertentes/voçorocas (Figura 3). Em três delas (Igrejinha: 5,03; Várzea: 6,7 e Mandim: 5,07), ele se encontra acima de 5, podendo ser considerado, segundo Prezotti e Guarçoni (2013), de fraca a média acidez. As duas primeiras vertentes/voçorocas ocorrem nas porções mais elevadas do relevo, no domínio das rochas da Fm. Posse, expostas relativamente mais tarde do ponto de vista geomorfológico, e, assim, ainda não submetidas ao intemperismo mais intenso das rochas expostas das porções mais baixas do relevo. O mesmo acontece com Mandim, parcialmente desenvolvida no domínio das rochas carbonáticas da Fm. Sete Lagoas do Grupo Bambuí (Figura 5) e que, por se encontrar topograficamente mais elevada, ainda não foi quimicamente tão alterada nessas áreas, como pode ser constatado pela presença mais elevada de Ca²⁺ e Mg²⁺ em seu regolito (Tabela 2).

Já Cabeceirinhas (4,9) localizada em vertentes modeladas em rochas da Fm. Posse, pobres em bases, e Campos (4,9), em carbonáticas bastante intemperizadas uma vez que é a mais próxima da foz e, assim, uma das primeiras áreas da Fm. Sete Lagoas expostas pelo recuo da rede de drenagem (Figura 5), variam de média a elevada acidez. Esses valores indicam a presença de alumínio trocável, ao contrário das três primeiras vertentes/voçorocas, nas quais o pH mais elevado, passa o alumínio para a forma insolúvel Al(OH)₃ (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001). Apesar disso, os valores médios do pH (H₂O) de Cabeceirinhas e Campos são mais altos do que, por exemplo, os medidos por Assis (2010) em área de Cerrado em São Paulo (4,8 a 4,1), ou por Conceição, Ruggieri e Silva (2014) em solos quatzarênicos (4,70; 4,75; 4,63; 4,75; 4,82; 0,14 e 2,86), no Maranhão. Os respectivos respectivos valores de Ca²⁺ (3,55/3,38) e Mg²⁺ (1,18/0,94) dos dois regolitos de Cabeceirinhas e Campos são relativamente elevados parecendo refletir variações locais do meio biofísico da bacia do rio Pandeiros. Apesar das variações dos valores do pH (H₂O) das vertentes/voçorocas, independentes da classe dos solos, as cinco apresentam valor médio de 5,32 que pode ser considerado como de média acidez pelos autores acima citados, e compatível com o encontrado por Moreno e Schiavini (2001), em solos arenosos de Uberlândia-MG (5,2), não apresentando, portanto, diferenciações muito representativas.

Verifica-se que, em qualquer uma das voçorocas, Igrejinha (4,18); Cabeceirinhas (4,17), Várzea (5,56), Mandim (4,27) e Campos (4,00), os valores médios do pH (KCl) foram maiores do que os do pH (H₂O), mostrando que há predominância de carga negativa líquida nos regolitos estudados (Tabela 2). A média de 4,4 das cinco voçorocas é considerada de acidez elevada (PREZOTTI; GUAÇONI, 2013), porém semelhantes às medidas por Ruggiero et al. (2002) na região sudeste do Brasil em solos do Cerrado, (4,4 a 3,7), e mais elevadas do que as medidas por Assis (2010) em SP (de 3,9 a 4,1).

A média da CE das cinco voçorocas é de 54,57 µS (Tabela 2), com o valor mais baixo em Mandim (39,29) e o mais elevado em Várzea (99,00), ou seja, com a maior concentração de íons neste último. Os valores de CE podem, no entanto, variar em função da alteração de outros fatores como a quantidade e qualidade da água intersticial, a densidade aparente dos regolitos e a compactação (CARMO et al., 2016; MIRANDA et al., 2006), estando, assim, associado, entre outros elementos, à textura do material. Isso pode explicar o valor relativamente alto (99,00 µS) medido em Várzea, que tem a maior quantidade de argila (176,8 g kg⁻¹), com influência no CO médio relativamente alto (4,93 g kg⁻¹). Já a maior quantidade de areia grossa de Mandim (236,85 g kg⁻¹) comparada com as demais vertentes/voçorocas estudadas, dificulta a condutividade elétrica nela medida (39,29 µS). O maior valor do CO (g kg⁻¹) na área de estudo (Tabela 2) foi obtido em Campos (8,95), onde as quantidades (g kg⁻¹) médias de Al₂O₃ (31,63) e de Fe₂O₃ (13,10), são relativamente elevadas comparadas com as de solos do Cerrad em geral. O menor valor de CO foi medido em Igrejinha (1,30), possivelmente em função do baixo estoque de atividade orgânica, a menor entre

as voçorocas, decorrente da sua localização em vertentes abruptas (Figuras 5 e 6) e com cobertura vegetal menos densa (LIMA; AUGUSTIN; OLIVEIRA, 2019). No entanto, mesmo assim, a média do carbono orgânico (CO) nos regolitos das cinco voçorocas estudadas é de $3,81 \text{ g kg}^{-1}$, próxima às encontradas por Brito et al. (2018) em solos do Cerrado.

A média dos cátions trocáveis de Ca^{2+} das cinco voçorocas atinge $3,63 \text{ cmolc/dm}^{-3}$ (Tabela 2), indicando tratar-se de valor considerado médio (1,5 a 4,0) por Prezotti e Guarçoni (2013), porém alto, por Sobral et al. (2015). O maior valor foi encontrado medido em Igrejinha (4,19), que é semelhante ao máximo verificado por Ruggiero et al. (2002) nos solos arenosos do Cerrado do sudeste brasileiro (8,87 a 4,75), e o menor ($3,30 \text{ cmolc/dm}^{-3}$), em Cabeceirinhas, o qual, mesmo assim, é mais elevado do que o reportado por Assis (2010), em Assis, SP (3 a 2 cmolc/dm^{-3}).

Os valores de Ca^{2+} , diferentemente daqueles do Mg^{2+} , não variam muito (Tabela 2). As concentrações de cálcio (cmolc/dm^{-3}): Igrejinha: 3,30; Cabeceirinhas: 3,55, Várzea: 4,19, Mandim: 3,70 e Campos: 3,38, podem ser consideradas altas (VENDRAME et al., 2011). Os valores de Mg^{2+} (cmolc/dm^{-3}) nos mesmos regolitos (1,65; 1,18; 2,54; 0,66 e 0,94, respectivamente), indicam a predominância de concentrações elevadas, exceto para Mandim (0,66). Pode-se assumir, portanto, que na área da bacia estudada, os regolitos são relativamente menos intemperizados nas porções mais elevadas do relevo do que nas baixas porções, o que é também evidenciado pelas menores concentrações, tanto de Ca^{2+} , como de Mg^{2+} , nas voçorocas de Mandim e Campos, ambas localizadas mais a jusante da bacia, localizadas próximas, ou praticamente em cima, do substrato de rochas metapelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí (Figura 5), onde se esperava que a concentração de bases fosse mais elevada. Esse fato sugere, portanto, está diretamente associado entre a exposição mais antiga das rochas da baixa porção da bacia ao intemperismo, causada pela erosão e recuo das cabeceiras, ao intemperismo.

O valor médio de Mg^{2+} ($1,39 \text{ cmolc/dm}^{-3}$) medido na bacia (Tabela 2) também é considerado alto comparado ao reportado ($1,18 \text{ cmolc/dm}^{-3}$) por Prezotti e Guarçoni (2013), estando, no entanto, abaixo (1,75 a 2,96) dos apontados por Ruggiero et al. (2002). A concentração mais elevada é encontrada em Igrejinha ($2,54 \text{ cmolc/dm}^{-3}$) e a menor, considerada por Sobral et al. (2015) como sendo de valor médio, nas voçorocas Mandim (0,66) e Campos (0,94). Ambas as voçorocas estão localizadas no baixo curso do rio Pandeiros (Figura 3) já próximas, em especial a segunda, do domínio das rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (Figura 5). Esse menor valor pode parecer indicar intemperismo mais intenso com perda de bases, típico de áreas de climas tropicais, mesmo que, no caso, a média anual de precipitação atual (887,2 mm), não seja muito elevada (JARDIM; MOURA, 2018) e, como já mencionado, ao tempo mais longo de exposição dessas rochas.

Os dados indicam a ausência de potássio (K^+) e sódio (Na^+), o que pode estar associado ao tipo de rocha matriz, predominantemente arenítica, gerando material arenoso dos solos (REATTO et al., 2008; SOBRAL et al., 2015), com baixos teores de argila. A ausência de ambos os elementos químicos nos regolitos das rochas carbonáticas do Grupo Bambuí pode, no entanto, ser atribuído à intensidade do intemperismo químico.

A quantidade média de Fe_2O_3 (g kg^{-1}) é de 20,92 (Tabela 2), que pode ser considerada baixa comparada com a encontrada por Gomes et al. (2004) em solos do bioma do Cerrado (104 a 26 g kg^{-1}), mas bem maior do que as medidas por Spera et al. (1999), também em solos do Cerrado (2,5 a $3,9 \text{ g kg}^{-1}$). O maior valor (g kg^{-1}) ocorre na voçoroca Várzea (46,82) e os menores em Mandim (10,99) e Campos (13,10). A variação das concentrações, que se reflete na cor vermelho-amarela dos solos que caracterizam a bacia (Figuras 7 e 9), é influenciada, segundo Vendrame et al. (2011), pela textura. Essa, por sua vez, como já apontado, pode ser atribuída, na área de estudo, a elementos do relevo, cujos processos expuseram as rochas do substrato, afetando também as condições hídricas das vertentes e, assim, dos regolitos, afetando, inclusive, o tipo de ferro, hematita ou goethita presente. Dessa maneira, enquanto as voçorocas com valores mais altos de ferro (I, II e III) encontram-se localizadas nas porções topograficamente mais altas (Figura 6), compostas por substrato das rochas da Fm Serra das Araras e da Fácies 2 da Fm Posse, ambas formações geológicas ricas em ferro, as duas últimas voçorocas (IV e V), têm grande parte das suas áreas em substrato rochoso formado por rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (CODEMIG-UFMG, 2015), ou seja, dessa maneira, os valores refletem, primeiramente, a disponibilização do ferro, cuja mesmo que a concentração deste tenda a variar ao longo do perfil e do ano (MIRANDA et al., 2006). A média de Fe_2O_3 para a área estudada é de $20,92 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto Burak et al. (2010) relatam um valor bem maior, de 61,30, para solos de Minas Gerais. A média nos regolitos da bacia do Pandeiros é menor do que a reportada por Gonçalves (2018), de 43,70, em solos do Pará, porém mais próxima à medida por Sousa et al. (2018), também no Pará (24,96).

A concentração (g kg^{-1}) de alumínio (Al_2O_3) dos regolitos das vertentes/voçorocas varia bastante, sendo maior em Várzea (93,85), onde o pH (H_2O) é alto (6,7) e menor em Mandim (21,80), onde o pH (H_2O) é de 5,07 (Tabela 2).

As demais vertentes/voçorocas têm valores de alumínio com pouca variação entre elas (Igrejinha: 35,92; Cabeceirinhas: 33,53; Campos: 31,63). De acordo com Echart e Cavalli-Molina (2001 p. 532) [...] “o Al^{3+} é um dos componentes mais importantes da acidez potencial do solo porque reage com a água, liberando íons H^+ ”. Segundo eles, a “acidez potencial devido ao Al trocável é observada em $pH \leq 5,5$,” podendo se assumir que este se encontra na forma precipitável, enquanto naqueles solos com pH acima de 5,5, “o alumínio encontra-se em formas precipitadas” (Echart; Cavalli-Molina, 2001 p. 532). A concentração média nos perfis dos regolitos estudados ($43,35 \text{ g kg}^{-1}$) é maior do que a relatada por Spera et al. (1999), por Assis (2010) e por Moreno e Schiavini (2001), que encontraram valores médios de Al de 4,00 para solos de Uberlândia-MG, enquanto Burak et al. (2010) registram as seguintes concentrações de Al (g kg^{-1}) para um conjunto de solos em Minas Gerais: mínimo: 100,30; média: 100,30; máxima: 229,70, e Gonçalves (2018): mínimo: 4,00; média: 99,85 e o máximo de 284 em solos arenosos do Pará. Segundo Rebêlo et al. (2020, p. 538), os maiores valores de alumínio são em solos com maiores teores de argila, o que também foi verificado na área de estudo (Tabela 2), uma vez que a maior quantidade de argila é encontrada em Várzea ($176,81 \text{ g kg}^{-1}$), onde a concentração de alumínio é também a mais elevada ($93,85 \text{ g kg}^{-1}$).

4.3. Análise dos Componentes Principais (ACP)

Os resultados da Análise dos Componentes Principais (ACP) indicam que os dois primeiros Componentes Principais (PC), são responsáveis por 45% da variância total no conjunto de dados, com PC1 respondendo por 26,4% e o segundo, PC2, por 18,6%. Os autovalores para cada componente (Figura 10) indicam que do primeiro ao quarto PC estão 68,5% da variância dos dados, com autovalores >1 ($\lambda_i > 1$) (KAISER, 1958; FRAGA et al. 2016). Os resultados da adequação global da análise fatorial para a ACP (FÁVERO; BELFIORE, 2017) foram: Kaiser-Meyer-Olkin (KMO): 0,559 e o teste de esfericidade de Bartlett: o valor de χ^2 (χ^2) é de 497,15 com 78 graus de liberdade (df), resultando em um p spherical de $2,661 \times 10^{-62}$ o que é um valor muito inferior a 0,05, indicando que podem ser extraídos fatores a partir dos dados. A carga fatorial em cada componente encontra-se identificada na Tabela 3.

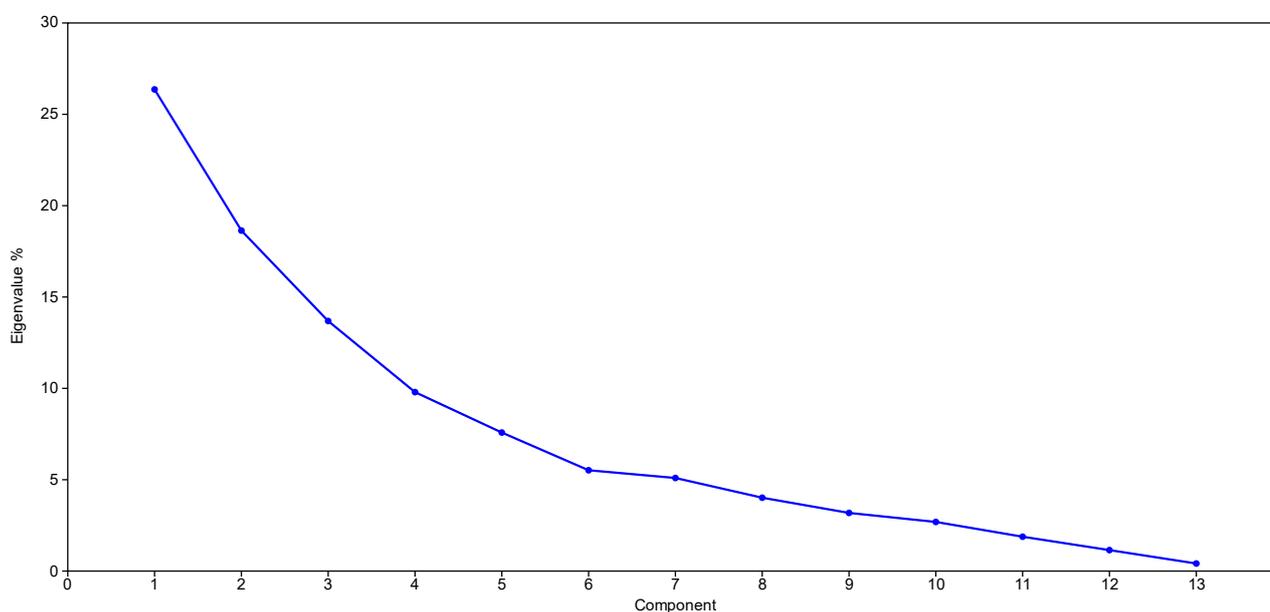


Figura 10. O *screeplot* dos autovetores dos componentes principais.

Na tabela 3, é possível identificar, dentre os fatores analisados, a carga fatorial entre as variáveis originais e cada um dos 4 principais componentes, apresentando alguns valores positivos e negativos.

Ao se observar a Tabela 3 é possível verificar que o atributo mais importante controlando a variabilidade de PC1, é a alta correlação positiva do silte, Mg^{2+} , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , onde percebe-se uma influência das voçorocas de Igrejinha e Cabeceirinhas e os materiais que estão no regolito já intemperizado. Já a correlação negativa é representada pela areia fina e Ca^{2+} , representadas, principalmente pelas voçorocas de Cabeceirinhas, Várzea e Mandim, indicando forte presença de materiais finos e o substrato rochoso. O PC 2 apresenta grande variabilidade positiva

com a areia grossa, a argila e o carbono orgânico, estes parâmetros ligados ao substrato rochoso e à cobertura vegetal, presentes nas voçorocas Igrejinha e Mandim, enquanto a correlação negativa é influenciada pela areia fina, silte, condutividade elétrica e Mg^{2+} , identificadas nas voçorocas de Cabeceirinhas e Várzea.

Tabela 3. Carga fatorial entre variáveis e principais componentes dos parâmetros de químicos e físicos médios por regolito de cada vertente/voçoroca amostrada.

PCA	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
AG (Areia Grossa 2-0,2 mm)	-0.067	0.538	-0.132	-0.034
AF (Areia Fina 0,2-0,05 mm)	-0.363	-0.374	0.026	0.125
S (Silte 0,05-0,002 mm)	0.374	-0.214	0.163	-0.354
A (Argila <0,002 mm)	0.220	0.419	-0.223	0.292
H2O (pH (H2O))	0.203	0.003	0.433	0.270
KCL (pH (KCl))	0.098	0.058	0.426	0.572
CE (Condutividade Elétrica)	0.156	-0.217	-0.493	0.198
CO (Carbono Orgânico)	0.000	0.445	0.062	-0.413
CA (Ca^{2+})	-0.334	0.172	0.103	0.023
MG (Mg^{2+})	0.347	-0.236	-0.187	-0.189
FE (Fe_2O_3)	0.463	0.114	0.123	-0.062
AL(Al_2O_3)	0.379	-0.008	0.066	0.100
TI (TiO_2)	-0.099	-0.057	0.473	-0.337

No PC 3, a correlação positiva é forte para o pH, em H₂O e KCl, e o TiO₂, enquanto a correlação negativa é forte para a condutividade elétrica. No PC 4 a correlação positiva é forte para o pH em KCl e a correlação negativa é forte para o silte, o carbono orgânico e o TiO₂.

A figura 12 foi elaborada com os dois principais componentes (P1 e P2) que respondem por quase a metade da variância dos demais parâmetros (45%), mostrando que os grupos de voçorocas estão dispostos preferencialmente ao longo dos dois eixos.

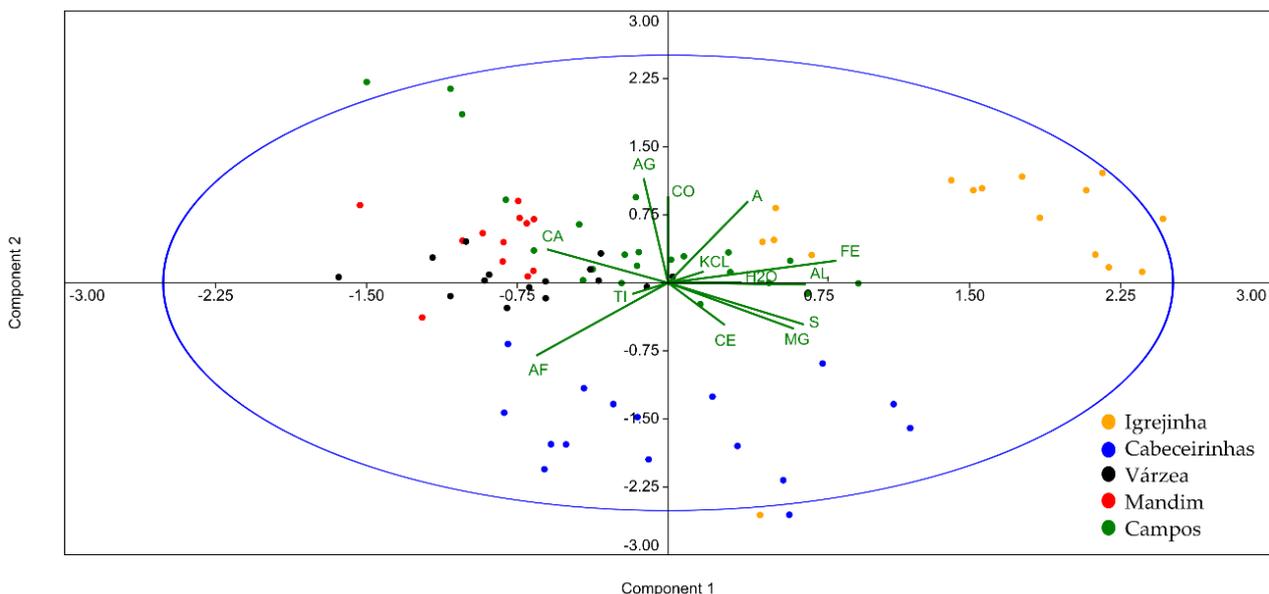


Figura 11. Gráfico biplot, mostrando a distribuição dos 13 parâmetros de cada um dos grupos de voçorocas, em relação aos dois componentes principais. **Legenda:** AG: Areia Grossa (2 – 0,2 mm); AF: Areia Fina (0,2 – 0,05 mm); S: (0,05 – 0,002 mm); A: Argila (< 0,002 mm); H2O: pH (H2O); KCL: pH (KCl); CE: Condutividade Elétrica (μS); CO: Carbono Orgânico ($g\ kg^{-1}$); CA: Ca^{2+} ; MG: Mg^{2+} ; FE: Fe_2O_3 ; AL: Al_2O_3 ; TI: TiO_2 .

Os eixos são formados pelos dois principais componentes (PC), sendo que o tamanho dos vetores e o ângulo entre estes demonstram uma relação quanto a relevância de cada parâmetro com as PC. Assim, ao observar os vetores das variáveis na figura 11, é possível notar que alguns apresentam ângulos variando de $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, significando que estes possuem algum tipo de correlação, uma vez que quanto mais próximo de 0° , maior é sua correlação. Levando em consideração a variabilidade total, o que demonstra impacto significativo dos parâmetros basicamente granulométricos nos demais, a ponto de permitir da mesma maneira que a análise das rupturas de declive (*knickpoints*), a distinção dos cinco grupos de vertentes/voçorocas, que formam, assim unidades diferenciadas, como pode ser visto no gráfico biplot. Vendrame et al. (2011, p. 1664) chegaram à conclusão semelhante ao utilizar a ACP para analisar a relação entre as formas de ferro e alumínio e a textura em solos do Cerrado, afirmando que “com exceção das formas de ferro e alumínio extraídas pelo pirofosfato, todas as demais formas foram influenciadas pela textura do solo”.

5. Discussão

Nesse trabalho, partiu-se do princípio de que o agrupamento das 215 voçorocas mapeadas na bacia do rio Pandeiros, MG, Brasil, em cinco (5) zonas principais, poderia ser explicado como resultante da influência de parâmetros geológicos/geomorfológicos do meio físico inerentes às vertentes onde elas ocorrem, com ênfase da análise sendo dada em dois conjuntos de elementos principais: 1) geológicos, em especial os litoestruturais, e os do relevo, ligados ao desnível altimétrico, à declividade, às rupturas de declive e outros elementos da morfologia/dinâmica da bacia como um todo; 2) as características físicas e químicas dos regolitos das vertentes onde essas voçorocas ocorrem.

A análise dos mapas: geológico, de declividade, *knickpoints* e hipsometria, com o auxílio do perfil longitudinal da bacia traçado ao longo do eixo do rio Pandeiros, indicou uma relação estreita entre a localização dos grupos de voçorocas e a presença de rupturas acentuadas de declive. Essas, por sua vez, se encontram associadas aos contatos geológicos (estrutura) tanto entre rochas com litologias variadas entre grupos geológicos diferentes (ex. Grupos Urucuia e Bambuí), como também, entre àquelas do mesmo grupo (ex. Fm Serra das Araras e Posse, ambas do Grupo Urucuia), herdados do passado geológico da área. A exposição desses contatos e as rupturas de declive, que aumentam a energia potencial dessas áreas à erosão, por sua vez, é resultante da ação dos processos geomorfológicos (tanto fluviais, como de encosta), ao longo do tempo.

Essa relação também ficou evidente nas análises dos parâmetros tanto físicos, como químicos, dos regolitos. Os valores granulométricos médios das vertentes/voçoroca mostrados na tabela 2, cada uma representando uma um grupo de voçorocas, mostra, por exemplo, variações de diâmetro e de textura, assim como dos parâmetros químicos em todas elas, decorrentes de características específicas das camadas sedimentares de cada grupo, ou formação geológica. Da mesma maneira, indica que variações de elementos químicos como Ca^{2+} e Mg^{2+} , se encontram, mesmo em rochas carbonáticas, atreladas ao tempo de exposição das rochas pelos processos de elaboração do relevo, o que condicionou a ocorrência de valores mais baixos destes parâmetros nas rochas mais próximas do nível de base nas porções topograficamente menos elevadas da bacia do rio Pandeiros, ou seja, as primeiras a serem expostas pela incisão da drenagem e esculturação das encostas e, nesse processo, também intemperizadas.

As informações obtidas a partir do mapa de solos da bacia (UFV; CETEC; UFV; FEAM, 2007), sugerem, da mesma maneira, grande influência geológica/geomorfológica nos tipos de solos, com a identificação e classificação basicamente de duas grandes classes: os Latossolos Vermelho Amarelos, que vão ocorrer das cabeceiras ao baixo curso da bacia, ocupando aproximadamente 2/3 dela, e os Neossolos Litólicos. Estes últimos, como era de se esperar, estão basicamente restritos às áreas de maior ação erosiva, ou seja, na escarpa a NW, correspondente à maior ruptura de declive da bacia, com um desnível de mais de 80 m entre o topo da Chapada das Gerais, no domínio da Fm Serra das Araras, ao início do domínio do relevo levemente ondulado modelado em rochas da Fm Posse. Verificou-se que tanto o mapa de classes de solos, como o mapa de declividade, não permite avaliação mais precisa dos elementos envolvidos na distribuição das voçorocas, já que a mesma classe de solo, em áreas com declividades semelhantes, não tem voçorocas.

A análise dos Componentes Principais (ACP), que teve o objetivo demonstrar a relação e a variabilidade dos 13 parâmetros físicos e físicos e químicos das 81 amostras do regolito dos 22 perfis das 5 vertentes/voçorocas, mostrou que dentre os quatro primeiros componentes principais, PC1 e PC2, estão associados à granulometria mais grossa do que a argila (areia grossa, areia fina e silte), respondendo por 45% da variabilidade dos demais parâmetros. A influência das areias e do silte sobre a argila e, também, sobre os parâmetros químicos, reflete, por sua vez,

a composição mineral do substrato rochoso da bacia, formado predominantemente por variações do diâmetro de areias quartzosas. As exceções ficam por conta, na porção mais baixa da bacia, da mudança das rochas areníticas do Grupo Urucuia, para as metapelíticas-carbonáticas do Grupo Bambuí. Essa variação litológica, bem como o papel da elaboração do relevo na exposição das rochas, pode ser observada através dos mapas geológico e hipsométrico, que mostram o material arenoso ocorrendo principalmente nas porções topograficamente mais elevadas do relevo, no domínio das rochas do Grupo Urucuia e as menos arenosas nas metapelíticas-carbonáticas das áreas menos elevadas da bacia, influenciando os parâmetros físico e químicos dos regolitos analisados. Da mesma maneira, a declividade e, em especial, as rupturas de declive, têm papel que deve ser considerado na análise da atuação dos processos geomorfológicos, tanto os de encostas, como fluviais, pela influência que exercem na iniciação da erosão, no transporte do material erodido, bem como na exposição dos sedimentos das rochas, com efeitos sobre as características físicas e químicas do regolito das vertentes. Isso influencia, portanto, o agrupamento e mesmo localização das voçorocas, o que é reforçado pelos resultados dos mapas utilizados na análise geomorfológica, uma vez que a granulometria é, na bacia, decorrente da exposição dos contatos litológicos entre os tipos de grupos de rochas dos diferentes grupos e, nestes, entre as diversas formações que o compõem de cada grupo.

A espacialização dos resultados da ACP também mostrou que os cinco grupos apresentam composição variada dos parâmetros físicos e químicos, específico de cada grupo de vertente/voçoroca, indicando tratar-se de populações amostrais diferentes, validando a amostragem, que partiu do princípio de que cada vertente/voçoroca amostrada representaria um grupo destas formas erosivas.

Os resultados dos mapeamentos indicam que é possível, com o uso de instrumentos de análise espacial, identificar fatores e elementos do meio natural envolvidos na localização preferencial e agrupamento de voçorocas, o que implica na facilitação deste tipo de estudo, sendo que esses mapas também se prestam a orientar a amostragem de campo. O mapa da figura 2 de drenagem e localização dos grupos de voçorocas, bem como o da figura 6, também indicam que os grupos de voçorocas estão alinhados ao eixo principal do rio Pandeiros, o que reforça o argumento de que mudanças do seu nível de base têm profunda influência na dinâmica geomorfológica, afetando principalmente as áreas de cabeceiras e as mais próximas do fundo do vale.

Não se pode descartar, no entanto, a ação de fatores antrópicos, como a presença de estradas vicinais e desmatamentos, e seus efeitos nas áreas de rupturas de declive e nos ajustes de nível de base, como indutores do agrupamento de voçorocas.

6. Conclusão

Os resultados da abordagem geomorfológica, com base em parâmetros geológicos e do relevo, para no entendimento dos fatores causais do agrupamento das 215 voçorocas mapeadas da bacia do rio Pandeiros em 5 áreas distintas, mostraram que a localização destes grupos sofre um forte controle de rupturas de declive identificadas na área, correspondentes a contatos geológicos expostos por processos de evolução do relevo. Não estão descartados, no entanto, os efeitos do impacto antrópico, em especial o provocado pela abertura de estradas vicinais e o desvio da drenagem ao longo das mesmas, como observado por Lima (2019) e Lima, Augustin e Oliveira (2019) e a possível influência da dinâmica fluvial através da mudança de nível de base do rio Pandeiros, uma vez que todos os grupos de voçorocas estão associadas ao eixo do seu canal.

A Análise dos Componentes Principais (ACP), na qual foram utilizados parâmetros físicos e químicos dos regolitos de cinco vertentes/voçorocas, cada uma representativa de um dos grupos, validou os resultados obtidos através da análise dos mapas e do perfil topográfico, mostrando a estreita relação entre a localização dos agrupamentos das voçorocas e as rupturas de declive. Os PCs identificados têm relação com as granulometrias de diâmetros maiores (areia e silte), indicando a influência da litologia nas características do material que compõem os regolitos. No tratamento estatístico, os vetores referentes a cada uma das variáveis e a identificação de quais seriam as variáveis características dos regolitos de cada grupo de vertente/voçoroca, mostraram pesos diferentes em cada área amostrada, indicando que, embora tenham componentes semelhantes, há variação espacial na combinação deles, fazendo com que cada voçoroca se individualize, o que é indicativo de que as voçorocas são heterogêneas, não fazendo parte da mesma população. Isso significa que, estatisticamente, cada uma representa um dos grupos.

A abordagem adotada neste trabalho com base na análise de elementos de fatores geológicos (litoestrutura) e geomorfológicos (topografia, declividade, hipsometria, rupturas de declive, com o uso de mapas e parâmetros físicos e químicos dos regolitos, com o uso da ACP, mostrou resultados consistentes, indicando o papel relevante

da evolução e dinâmica do relevo na suscetibilidade de áreas específicas da bacia do rio Pandeiros para a ocorrência preferencial de voçorocas.

Contribuições dos Autores: Concepção: C.H.R.R.A., D.A.O., T.A.N., A.C.P.L.; Metodologia: C.H.R.R.A., A.C.P.L.; Software: C.H.R.R.A., D.A.O.; Validação: C.H.R.R.A., D.A.O.; Análise formal: C.H.R.R.A.; Pesquisa: C.H.R.R.A., A.C.P.L.; Recursos: C.H.R.R.A.; Preparação de dados: C.H.R.R.A., D.A.O., A.C.P.L.; Escrita do artigo: C.H.R.R.A., T.A.N., A.C.P.L.; Revisão: C.H.R.R.A., D.A.O.; Supervisão: C.H.R.R.A., T.A.N.; Aquisição de financiamento: C.H.R.R.A. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, projeto de pesquisa CRA-APQ-03773-14.

Agradecimentos: à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro ao projeto de Pesquisa Sustentabilidade da Bacia do Rio Pandeiros-MG (CRA-APQ-03773-14); ao IGC/UFGM, pela disponibilização da infraestrutura de campo e laboratorial para a realização desta pesquisa e a CAPES pela concessão da bolsa de estudo de mestrado.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

- ASSIS, A. C. C. **Parâmetros e classes de solos na diferenciação da fisionomia de cerrado em Assis, SP.** Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Ambientais) - Instituto agrônomo, Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Campinas, SP. 2010. 78p.
- AUGUSTIN, C. H. R. R. **A preliminary integrated survey of the natural resources near Alcantarilla, Southeast Spain.** Dissertação (Master of Science) - Department of Geography, University of Sheffield, Sheffield, UK. 1979. 328p.
- AUGUSTIN, C. H. R. R. **Geoökologische Studien im südlichen Espinhaçogebirge bei Gouveia, Minas Gerais, Brasilien unter besonder Berücksichtigung der Landschaftsentwicklung.** Tese (Doutorado em Geociências) - Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt am. Main, Alemanha. 1995. 294p.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 1, p. 09-18, 2006. DOI: 10.20502/rbg.v7i1.56
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; FONSECA, B. M.; OLIVEIRA, D. A. de.; LIMA, A. C. P. de.; ARANHA, P. R. A.; SILVA, P. D. O.; SABINO, S. M. L.; FRANCO, G. G. (2020). Geomorfologia: análise da dinâmica de encostas e da hidrogeomorfologia da bacia de drenagem do rio Pandeiros - Subprojeto 1a. In: **Projeto Sustentabilidade da bacia do rio Pandeiros - MG: dinâmica de vertentes da bacia do rio Pandeiros** (APQ-03773/14). Belo Horizonte: FAPEMIG, MG. 206 p. 2020. Disponível em: www.igc.ufmg.br/wp-content/uploads/2022/11/RELATORIO-FINAL-Subproj.1a-GEOMORFOLOGIA.pdf
- AUGUSTIN; C. H. R. R.; COE, H. H. G.; CHUENG, K. F.; GOMES, J. G. Analysis of geomorphic dynamics in ancient quartzite landscape using phytolith and carbon isotopes, Espinhaço, Mountain Range, Minas Gerais, Brazil. **Géomorphologie, relief, processus, environnement**. v. 2014, n. 4, p. 55-76. DOI: 10.4000/geomorphologie.10794
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; FONSECA, B. M.; OLIVEIRA, D. A. DE; LIMA, A. C. P. DE; ARANHA, P. R. A. Aspectos do relevo da bacia do rio Pandeiros: análise de perfis longitudinal e transversais. **MG.BIOTA**, Belo Horizonte, v.15, n.1, p. 35-63, jan./dez. 2022a.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; FONSECA, B. M.; OLIVEIRA, D. A. DE; LIMA, A. C. P. DE; ARANHA, P. R. A.; Franco, G. G.; Bandeira, J V. Características da drenagem fluvial e de encosta e sua relação com o relevo na bacia do rio Pandeiros – MG. **MG.BIOTA**, Belo Horizonte, v.15, n.1, p. 64-91, jan./dez. 2022b.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; FONSECA, B. M.; OLIVEIRA, D. A. DE; LIMA, A. C. P. DE; ARANHA, P. R. A.; Franco, G. G.; Bandeira, J V. Características da drenagem fluvial e de encosta e sua relação com o relevo na bacia do rio Pandeiros – MG. **MG.BIOTA**, Belo Horizonte, v.15, n.1, p. 64-91, jan./dez. 2022b.
- BANDEIRA, J. V.; SALIM, L. H.; CHAGAS, C. J.; CAMARGOS, C. C.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; JARDIM, C. H.; ARANHA, P. R. A.; COSTA, A. M.; SÁ, L. P.; FRANÇA, G. P. Estudos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do rio Pandeiros, MG, em um contexto multidisciplinar. In: XIII, Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Partículas nas Américas I, 2018. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRHidro (ed.), p. 1-8. 2018. Disponível em: anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=402
- BERGONSE, R.; REIS, E. Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression-based exploration using reconstructed pre-erosion topography. **Catena**, 2011,147,621–631. DOI: 10.1016/j.catena.2016.08.014

12. BETHONICO, M. B. M. **Área de proteção ambiental estadual do rio Pandeiros-MG: espaço, território e atores**. Rio de Janeiro, Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal Fluminense. RJ. 2009a. 288p.
13. BETHONICO, M. B. M. Rio Pandeiros: território e história de uma área de proteção ambiental no norte de Minas Gerais. **Revista Acta Geográfica**, v. 5, n. 3, p. 23-38. 2009b. DOI: 10.5654/acta.v3i5.214
14. BRADFORD, J. M.; PIEST, R. F. Erosional development of valley-bottom gullies in the Upper Midwestern United States. In: **Thresholds in Geomorphology**, Coates D. R., Vitek, J. D. (eds). London: Allen & Unwin, p. 75–101, 1985.
15. BRITO, M. R.; FLÁVIA SIQUEIRA, L. T.; SOUSA, I. J. A.; SOUSA, R. N. Estoque de carbono no solo sob diferentes condições de cerrado. **Revista Desafios**, v. 5, n. Especial, 2018, p. 114 -124. DOI: 10.20873/uft.2359-3652.2018vol5nEspecialp114
16. BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, v. 32, n. 3-4, p. 385-415, 2000. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00105-1
17. BURAK, D. L.; FONTES, M. P. F.; SANTOS, N. T.; MONTEIRO, L. V. S.; MARTINS, E. S.; BECQUER, T. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. **Geoderma**, 2010. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.08.007
18. CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. A estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 269-282, setembro, 1997.
19. CARMO, D. L.; SILVA, C. A.; LIMA, J. M.; PINHEIRO, G. L. Electrical Conductivity and Chemical Composition of Soil Solution: Comparison of Solution Samplers in Tropical Soils. **Rev Bras Cienc Solo**, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbc20140795
20. CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. **Hillslope form and process**. 1. ed. Londres: Cambridge University Press, 1975.
21. CARUSO; C. K. D.; TIDY, C. J.; DELEAN, S.; LEWIS, M. M. Regolith-Landform Mapping Alicia, S. Objective Regolith-Landform Mapping in a Regolith Dominated Terrain to Inform Mineral Exploration. **Geosciences**, 2018, 8, 318. DOI: 10.3390/geosciences8090318.
22. CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. **Earth-Sci. Rev.**, v. 160, p. 300–319, 2016. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.07.009
23. CEMIG. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Ortofotos da bacia do rio Pandeiros**, esc: 1:60.000, 1969.
24. CETEC. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **2º Plano de desenvolvimento integrado do Noroeste Mineiro: recursos naturais/ Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais**. (2ª. edição). Belo Horizonte, MG: CETEC-FINEP. 1981. 359p.
25. CHAGAS, C. J.; MOREIRA, R. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; BANDEIRA, J. V.; CARVALHO FILHO, C. A. de. Reuse of a dam as sediment trap and water reserve. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 27, e27, 2022. ISSN 2318-0331. DOI: 10.1590/2318-0331.272220220067
26. CHIKWELU, E. E.; OGBUAGU, F. U. Geotechnical Investigation of soils around Mbaukwu Gully Erosion Sites South – Eastern part of Nigeria. **Journal of Applied Geology and Geophysics**, v. 2. p. 6 – 17, 2014. DOI: 10.9790/0990-0240617
27. CHRISTIAN, C. S., STEWART, G. A. Methodology of Integrated Surveys: Aerial Surveys and Integrated Surveys. In: **Proc. Toulouse Conference**. UNESCO. 1968.
28. COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE MINAS GERAIS (CODEMIG); UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). **Projeto Fronteiras de Minas Mapa Geológico: Folha Catolé: (SD.23-Z-C-I); Folha Januária: Mapa Geológico (SD.23-Z-C-II); Folha São Francisco: Mapa Geológico (SD.23-Z-C-IV); Folha São João da Ponte: Mapa Geológico (SD.23-Z-C-V); Folha São Joaquim: Mapa Geológico (SD.23-Y-D-III)**, escala 1.100.000. Belo Horizonte, MG, 2015. disponíveis em <http://www.portalgeologia.com.br/>. Acessado 12 de janeiro de 2017.
29. CONCEIÇÃO, G.; RUGGIERI, A. C.; SILVA, W. Propriedades Químicas de um Neossolo Quartzarênico, Maranhão, Brasil. **Agrarian Academy**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.1, n. 1, p. 347-352, 2014. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/agrarian/article/view/5227>.
30. CROUCH, R. J.; BLONG, R. J. Gully sidewall classification-methods and applications. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 33, n. 3, p. 291-305. 1989. DOI: 10.1127/zfg/33/1989/291
31. DANIELS, R. B.; HAMMER, R. D. **Soil Geomorphology**. Nova York: John Wiley & Sons. 1992. 216p.
32. DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. (2ª ed.). Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2003. 230p.
33. ECHART; C. L.; CAVALLI-MOLINA. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 531-541, 2001. DOI: 10.1590/S0103-84782001000300030
34. FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 1187 p.

35. FONSECA, B. M. **O uso do Sistema de Informações Geográficas na análise morfométrica e morfológica de bacias de drenagem na Serra do Espinhaço Meridional – MG.** Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010. 93p.
36. FONSECA, B. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Use of GIS to calculate Hack Index as a basis for comparative geomorphologic analysis between two drainage basins: a case study from SE-Brazil. In: International Geographic Union Regional Geographic Conference, 2011, Santiago, Chile. **Proceedings ...** Santiago: International Geographic Union -UGI, 2011, v. 1. p. 1-12, 2011.
37. FRAGA, A. B., DE LIMA SILVA, F., HONGYU, K., SANTOS, D. D. S., MURPHY, T. W.; LOPES, F. B. Multivariate analysis to evaluate genetic groups and production traits of crossbred Holstein× Zebu cows. **Tropical animal health and production**, v. 48, n. 3, p. 533-538, 2016. DOI: 10.1007/s11250-015-0985-2
38. FROTA, R. C. **Influência da política pública ambiental como promotora do desenvolvimento: a experiência do projeto de desenvolvimento sustentável do Pandeiros, município de Januária – MG.** Tese (Doutorado em Desenvolvimento Rural) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013. 238p.
39. GARDINER, V.; DACKOMBE, R. **Geomorphological Field Manual.** London: George Allen & Unwin. 1983. 254p.
40. GOMES, J. B. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J. C.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SCHULZE, D. G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 137- 153, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000100014
41. GOMES, J. H. G.; PEREIRA, M. G.; CEDDIA, M. B.; MORAES, A. G. de L.; BARROS, F. C. Variabilidade de atributos edáficos em diferentes ambientes de voçorocas no bioma da Mata Atlântica: gullies in Mar de Morros environments. **Energia na Agricultura**, v. 1, p. 9736-110, 2021. DOI: 10.17224/EnergAgric.2021v36n1p97-110
42. GOMES, J. H. G.; PEREIRA, M. G.; FRANCELINO, M. R.; LARANGEIRA, J. P. B. Physical and chemical attributes of soil on gully erosion in the Atlantic Forest biome. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 2, p. e2459, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2459>.
43. GOMEZ, B.; BANBURY, K.; MARDEN, M.; TRUSTRUM, N. A.; PEACOCK, D. H.; HOSKIN, P. J. Gully erosion and sediment production: The Weraroa Stream, New Zealand. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, p. 1-7, 2003. DOI: 10.1029/2002WR001342
44. GONÇALVES, D. A. M. **Metais e elementos terras raras em solos da Amazônia Oriental.** Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018. 74f.
45. GOOGLE EARTH PRO. **Imagem.** website. <http://earth.google.com/>, 2017 a 2022.
46. GOUDIE, A. (Ed.). **Geomorphological Techniques.** London: George Allen & Unwin. 1981. 395p.
47. HANCOCK, G. R.; EVANS, K. G. Gully position, characteristics, and geomorphic thresholds in an undisturbed catchment in Northern Australia. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 14, p. 2935-2951, 2006. DOI: 10.1002/hyp.6085
48. HEEDE, B. H. Gully development and control: the status of our knowledge. **USDA Forest Service Research Paper RM-169**, Fort Collins, 1976. 42 p.
49. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa da vegetação do Brasil.** Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE. 2004b.
50. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de biomas brasileiros.** Escala 1: 5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE. 2004a.
51. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Topodata:** banco de dados geomorfométricos do Brasil. banco de dados geomorfométricos do Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>. Acesso em: 16 out. 2022.
52. JARDIM, C. H.; MOURA, F. P. Variações dos totais de chuvas e temperatura do ar na bacia do rio Pandeiros, norte do estado de Minas Gerais-Brasil: articulação com fatores de diferentes níveis escalares em área de transição climática de cerrado para semiárido. **Revista Brasileira de Climatologia** (Ed. Esp.), Dossiê Climatologia de Minas Gerais, v. 1, p. 168-189, 2018. DOI: 10.5380/abclima.v1i0.61013
53. JONES, J. A. A. Soil piping and stream channel initiation. **Water Resources Research**, v. 7, n. 3, p. 602- 610, 1971. DOI: 10.1029/WR007i003p00602
54. KAISER, H.F. 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p: 187- 200. DOI: 10.1007/BF02289233
55. LEMOS, R. C., SANTOS, R. D., SANTOS, H. G., KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** (6 ed.). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100p.
56. LIMA, A. C. P. **Análise da distribuição espacial de voçorocas em domínio de rochas siliciclásticas: bacia do Rio Pandeiros - MG.** Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019. 83p.

57. LIMA, C. P.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; OLIVEIRA, D. A. Distribuição espacial de voçorocas e sua relação com o relevo em escala de bacia para fins de amostragem: rio Pandeiros-MG. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2019. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, CE, XVIII SBGFA, 2019.
58. MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SANTOS, F. S. dos. **Métodos de Preparo de Amostras e de Determinação de Carbono em Solos Tropicais**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Circular Técnica, 19. EMBRAPA: Rio de Janeiro, RJ, Dez, 2003. 9p.
59. MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A.; ANTÓN-FERNÁNDEZ C.; RAMOS, M. C. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high-resolution digital elevation models and geographical information systems analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 28, p. 443-456, 2003. DOI: 10.1002/esp.451
60. MARTINS, B.; NUNES, A.; MEIRA-CASTRO, A.; LOURENÇO, L.; HERMENEGILDO, C. Local Factors Controlling Gully Development in a Mediterranean Environment. **Land**, 2022,11, 204. DOI: 10.3390/land11020204
61. MESSIAS-MARTINS, R., AMORIM, M. A. F., AUGUSTIN, C. H. R. R.; AZEVEDO, P. A. A. Relação entre forma da vertente, cobertura superficial e sítios geomorfológicos na bacia do ribeirão do Chiqueiro, depressão de Gouveia, Serra do Espinhaço Meridional-MG. **Geonomos**, v. 21, n. 2, p. 2013. DOI: 10.18285/geonomos.v21i2.270
62. MIRANDA, J.; COSTA, L. M.; RUIZ, H. A.; EINLOFT, R. Composição química da solução de solo sob diferentes coberturas vegetais e análise de carbono orgânico solúvel no deflúvio de pequenos cursos de água. **Bras. Ci. Solo**, v. 30, p: 633-647, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000400004
63. MONKHOUSE, F. J.; SMALL, J. **A Dictionary of the Natural Environment**. (3^a.ed.) London: Edward Arnold. 1978. 320p.
64. MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A. E.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57 n. 2, p. 443-452. 1993. DOI: 10.2136/sssaj1993.03615995005700020026x
65. MORENO, M. I. C.; SCHIAVINI, I. Relação entre vegetação e solo em um gradiente florestal na Estação Ecológica do Panga, Uberlândia (MG). **Revista Brasileira de Botânica**, SP (suplemento), v. 24, n. 4, p. 537-544, dez. 2001. DOI: 10.1590/S0100-84042001000500008
66. MOURA, F.; JARDIM, C. H. 2017. Variação temporal das chuvas em Januária, Carinhanha e Montes Claros, norte do estado de Minas Gerais. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 2705-2709, 2017. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2423
67. MUNSELL COLOR. **Munsell soil color charts**. Grand Rapids, MI. 2000.
68. OLIVEIRA, D. A. **“Wetland” como unidade hidrogeomorfológica na transição entre o cerrado e o semiárido mineiro: análise da dinâmica do pantanal da bacia de drenagem do rio pandeiros - MG**. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. 418p. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/37807>. Acesso em: 06 nov. 2022.
69. OLIVEIRA, D. A., AUGUSTIN, C. H. R. R.; FONSECA, B. M. Proposta de mapeamento e delimitação dos domínios geomorfológicos da bacia hidrográfica do rio Pandeiros-MG. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p.6253-6262, 2017. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2520
70. OLIVEIRA, D. A. DE; AUGUSTIN, C. H. R. R.; LIMA, A. C. P. Caracterização e dinâmica das unidades hidrogeomorfológicas do Pantanal do rio Pandeiros, Minas Gerais, Brasil. **MG.BIOTA**, Belo Horizonte, v.15, n.1, p. 92-115, jan./dez. 2022.
71. OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; FERRAZ, F. B.; JACOMINE, P. K. T. Classificação de solo planossólicos do sertão do Araripe (PE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n. 1, p. 157-164, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400013>
72. PAIN, C. F. **Field Guide for Describing Regolith and Landforms**. Canberra, Australia. CRC LEME, CSIRO. 2008.
73. POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environment change: Importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91-133, 2003. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1
74. PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. Guia de interpretação de análise de solo e foliar. Vitória, ES: **Incaper**, 2013. 104 p.
75. QUEIROZ, G.L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E.R. Knickpoint finder: A software tool that improves neotectonic analysis. **Computers e Geosciences**, v. 76, p.80-87, 2015. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.11.004
76. RĂDOANE, M.; RĂDOANE, N. Gully Erosion. In: M. Rădoane; A. Vespremeanu-Stroe (eds.), **Landform Dynamics and Evolution in Romania**, Springer Geography, chapter 16, p. 371-397, 2017. Switzerland: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-32589-7_16.
77. REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. S. Solos do bioma cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S. P., Ribeiro, F. J. (Eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. Planaltina, DF: **EMBRAPA- Informação Tecnológica**, v. 1, capítulo 5, p. página -134, 2008. 406 p.

78. REBÊLO, A. G. M.; MONTEIRO, M. T. F.; FERREIRA, S. J. F.; RÍOS-VILLAMIZAR, E. A.; QUESADA, C. A. N.; DUVOISIN JUNIOR, S. Valores de referência da concentração de metais pesados em solos na Amazônia Central. **Quim. Nova**, v. 43, n. 5, p. 534-539, 2020. DOI: 10.21577/0100-4042.20170516
79. RUGGIERO, P. G. C.; BATALHA, M. A.; PIVELLO, V. R.; MEIRELLES, S. T. Vegetation soil relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. **Plant Ecology**, v. 160, p. 1-16, 2002. DOI: 10.1023/A:1015819219386
80. SCOTT, K. M.; PAIN, C. F. (Eds). **Regolith Science**. Collingwood, Australia: CSIRO Publishing and Springer. 2008. 461p.
81. SIDLE, R. C.; JARIHANI, B.; KAKA, S. I.; KOCHI, J.; AL-SHAIBANI, A. Hydrogeomorphic processes affecting dryland gully erosion: Implications for modelling. **Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.**, v. 43, 2019. DOI: 10.1177/0309133318819403
82. SOBRAL, L. F.; VASCONCELLOS, M. C.; BARRETTO; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia Prático para Interpretação de Resultados de Análises de Solo**. Embrapa Tabuleiros Costeiros Aracaju, SE DOCUMENTOS 206, (1ª Ed.) dez., 2015. On-line (2015). Disponível em: bdpa.cnptia.embrapa.br
83. SOUSA, E. A. B.; REIS, I. M. S.; MELÉM JÚNIOR, N. J.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FREITAS, L. Quantificação de óxidos de ferro em solos do cerrado do Estado do AMAPÁ. In: **Solos nos Biomas Brasileiros**. 3, EMBRAPA-AMAPÁ, Cap. 5, p. 37-45, 2018.
84. SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, E. S.; CORREIA, J. R.; CUNHA, T. J. F. Solos areno-quartzosos no Cerrado: características, problemas e limitações ao uso. Planaltina: **Doc. Embrapa Cerrados**, n. 7, p. 1-48, dez, 1999. 48p.
85. TAYLOR, G.; EGGLETON, R. A. **Regolith Geology and Geomorphology**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2001. 375p.
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 Syst. Sci.**, v. 14, p. 2207-2217, 2010. DOI: 10.5194/hess-14-2207-2010
87. TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 10 set. 2023.
88. UFV; CETEC; UFV; FEAM. Universidade Federal de Viçosa; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; Universidade Federal de Lavras; Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2007.
89. VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005. DOI: 10.1016/j.catena.2005.06.001
90. VENDRAME, P. R. S.; EBERHARDT, D. N.; BRITO, O. R.; MARCHÃO, R. L.; QUANTIN, C.; BECQUER, THIERRY. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, suplemento 1, p. 1657-1666, 2011. DOI: 10.5433/1679-0359.2011v32Supl1657
91. WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.
92. WEAVER, W. E.; HAGANS, D. K.; POPENOE, J. H. Magnitude and Causes of Gully Erosion in the Lower Redwood Creek Basin, Northwestern California. Geomorphic processes and aquatic habitat in the redwood creek basin, northwestern California. **US Geological Survey Professional Paper** 1454-1, 1995. 121p.
93. WEISS, A. D. Topographic Position and Landforms Analysis. In: **Environmental Systems Research Institute, Inc (ESRI)**, User Conference, San Diego, CA, USA, Proceedings...San Diego, p. 9-13, July 2001.
94. WRIGHT, R. L. An examination of the value of site analysis in field studies in tropical Australia. Stuttgart: **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 17, n. 2, p. 156-184, 1973.
95. YOUNG, A. **Slopes**. Londres: Logman. 1972. 160p.



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.