

Susceptibilidade à erosão no Rio Gualaxo do Norte – MG

Erosion susceptibility in Gualaxo do Norte River – MG

*João Pedro dos SANTOS*¹
*Guilherme Eduardo Macedo COTA*²
*Brenda Fernandes LIMOEIRO*³
*Klinsmann Cortezzi PEDRAS*⁴
*Adriana Monteiro da COSTA*⁵
*João Herbert Moreira VIANA*⁶

RESUMO

No ano de 2015 a barragem de contenção de rejeitos de Fundão, pertencente à mineradora Samarco S/A se rompeu, causando o maior desastre socioambiental envolvendo mineração no Brasil. O rompimento gerou uma nova configuração espacial em termos erosivos para a bacia, sobretudo no que tange aos sistemas fluviais. Frente ao exposto, o trabalho objetivou mapear a susceptibilidade à erosão na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, Mariana (MG). Para tanto, foi utilizado o método de Analytic Hierarchy Process (AHP) a partir de variáveis pré-definidas para identificação dos locais onde o rejeito de minério ficou depositado. Os resultados indicam que as classes “Forte” e “Muito Forte” para susceptibilidade à erosão aparecem, principalmente, na calha dos cursos d’água atingidos pelos sedimentos. Esse rejeito formou uma nova camada superficial de material particulado que se apresenta fino e sem estrutura que ali permaneceu colmatado. Deste modo, os cenários de turbidez das águas são agravados pela presença do rejeito nas calhas fluviais e pelo carreamento do material depositado nas áreas adjacentes para os fundos de vale, ocasionando forte impacto na morfologia do canal e na biota aquática.

Palavras-chave: Processos Erosivos; Sistema de Informação Geográfica; Desastre Ambiental.

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil. joaopedrosgeo@gmail.com

² Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil. guilhermehbmg@hotmail.com

³ Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil. brendafl@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil. klinsmanncortezzi@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, MG, Brasil. drimonteiroc@gmail.com

⁶ Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, Brasil. jherbertmviana@gmail.com

ABSTRACT

In 2015 the Fundão tailings dam, belonging to Samarco S/A, collapsed in Mariana (MG), causing the greatest socio-environmental disaster involving mining in Brazil. The Gualaxo do Norte river drainage basin has as a tributary the Santarém creek where the break occurred. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was used with the variables chosen were: Pedological Coverage, Litology, Declivity and Ground Usage and Coverage. The results indicate that the "Strong" and "Very Strong" classes for susceptibility to erosion appear mainly in the drainage channels. The reject formed a new superficial layer of particulate material thin and structureless. Thus, the water turbidity scenarios are aggravated by the presence of the tailings in the drainage channels and by the transport of the material deposited in the adjacent areas to the valley bottoms, causing a strong impact on the channel morphology and the aquatic biota.

Keywords: Erosion Process; Geographic Information System; Environmental Disaster.

* * *

Introdução

A erosão é um processo natural que ocorre em toda a superfície terrestre, sendo que diversas atividades antrópicas podem acelerar este processo. O Brasil apresenta grandes taxas de erosão em boa parte de seus solos, decorrente dos seus aspectos morfoclimáticos (AB' SABER, 1967). Saito (2004) considera a susceptibilidade à erosão como sendo “característica inerente ao meio, representando a fragilidade do ambiente em relação aos escorregamentos”.

Através das ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é possível verificar as áreas com maior ou menor susceptibilidade à erosão. Os SIG se configuram como uma importante ferramenta para a análise espacial de fenômenos, podendo ser aplicados ao planejamento do uso da terra e no manejo dos recursos naturais, fortalecendo mecanismos de gestão ambiental.

Existem métodos multicritérios que são utilizados para validação empírica de estudos espaciais. Sob consulta da literatura referente à temática, diferentes categorias recebem pesos e são associadas para verificação da susceptibilidade à erosão a partir de um mapeamento resultante (WISCHMEIER e SMITH, 1978; DIAS et al., 2003).

Dentro da esfera de planejamento e manejo ambiental, a análise e elaboração de mapas com fins de determinar a susceptibilidade à erosão por meio de SIG é amplamente trabalhada na literatura (ROSS, 1994; CORSEUIL, 2006; CÂMARA e MEDEIROS, 1998). De acordo com Malczewski (2004) existem três métodos principais para a elaboração de cartas de susceptibilidade à erosão, que são as operações de sobreposição de planos de informação (dados espaciais), inteligência artificial (IA) e o método de avaliação de multicritério, sendo que este último só foi possível a partir de avanços na metodologia da sobreposição de planos de informação e de sua integração com os SIG (CORSEUIL, 2006).

De acordo com Roy (1996), a análise multicritério compreende a uma ferramenta matemática que permite combinar diferentes alternativas e/ou cenários tendo como base vários critérios. A integração da análise de multicritério e os SIG envolvem a utilização de dados geográficos de acordo com regras específicas utilizadas pelos gestores no processo de tomada de decisão (MALCZEWSKI, 2004).

O método Analytic Hierarchy Process (AHP) é considerado um dos principais métodos de comparação entre as variáveis utilizadas. O AHP consiste basicamente em expressar o grau de preferência de uma variável a partir de comparações par a par com outras variáveis em estudo, atribuindo um valor de importância na relação entre eles a partir de uma escala pré-definida (SAATY, 1977).

Saaty (1980) elaborou uma escala de comparação entre as variáveis com valores que variam de 1 a 9 segundo o seu grau de importância. A partir da comparação, o método AHP pondera as variáveis e calcula a razão de consistência, que varia de 0 a 1 e indica a consistência dos valores atribuídos (CÂMARA et al., 2001). Quanto mais próximo de 0 maior será a consistência do processo de julgamento.

Objetivou-se mapear a susceptibilidade à erosão na bacia do rio Gualaxo do Norte, após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos de Fundão, pertencente à Samarco S/A, em Mariana (MG). O rompimento é considerado o maior desastre socioambiental do Brasil e o maior desastre

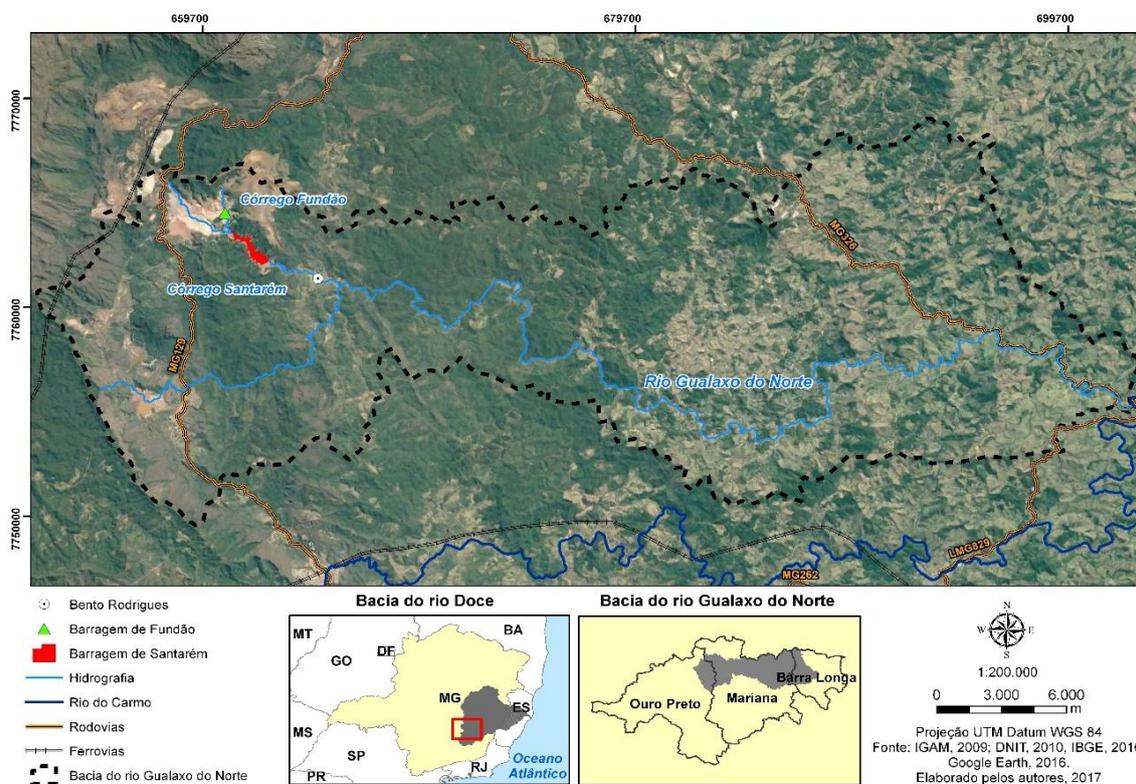
envolvendo barragens de mineração do mundo. O rompimento lançou 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro na calha do córrego Santarém, afluente do rio Gualaxo do Norte e pertencentes à bacia do rio Doce. Estes sedimentos percorreram cerca de quarenta municípios ao longo da bacia até desaguar no Oceano Atlântico (PINTO-COELHO, 2015).

Material e Métodos

Caracterização da Área

Situado na região sudeste do Brasil, o rio Gualaxo do Norte (Figura 1) pertence à bacia hidrográfica do rio Doce, que por sua vez, compreende uma área de drenagem de 83.400 km², sendo que 86% de sua área está no Estado de Minas Gerais e outros 14% no Espírito Santo, onde o rio Doce deságua no Oceano Atlântico (IGAM, 2012).

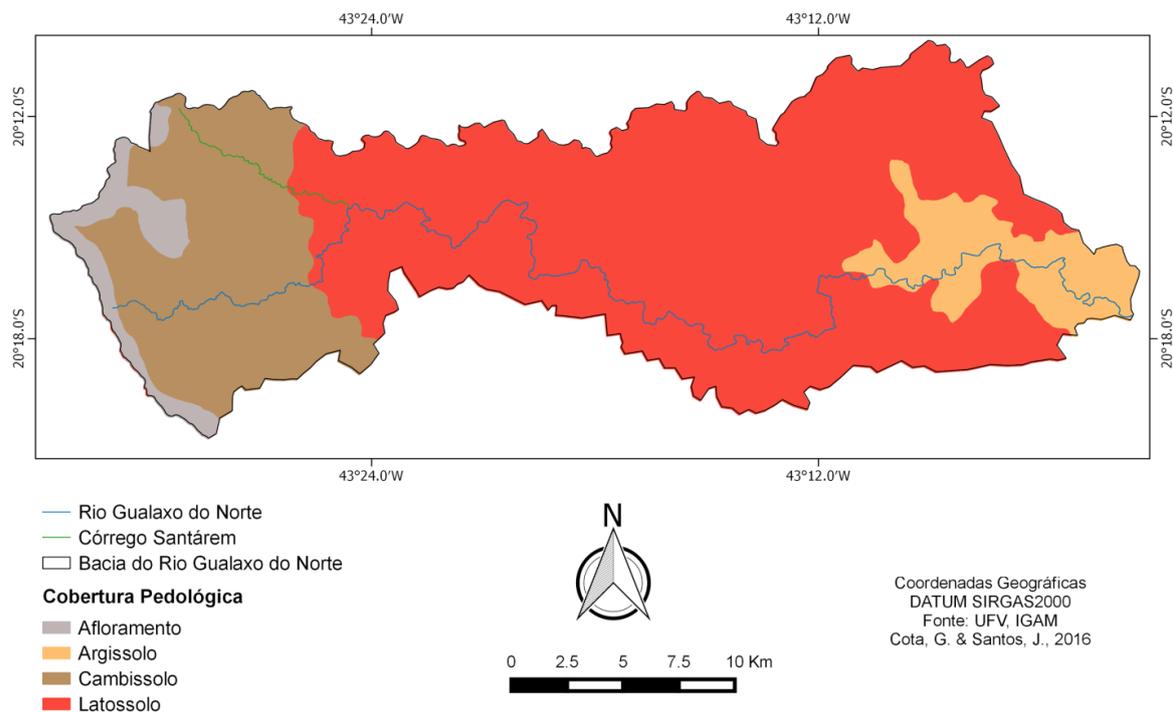
Figura 1. Localização da bacia do rio Gualaxo do Norte.



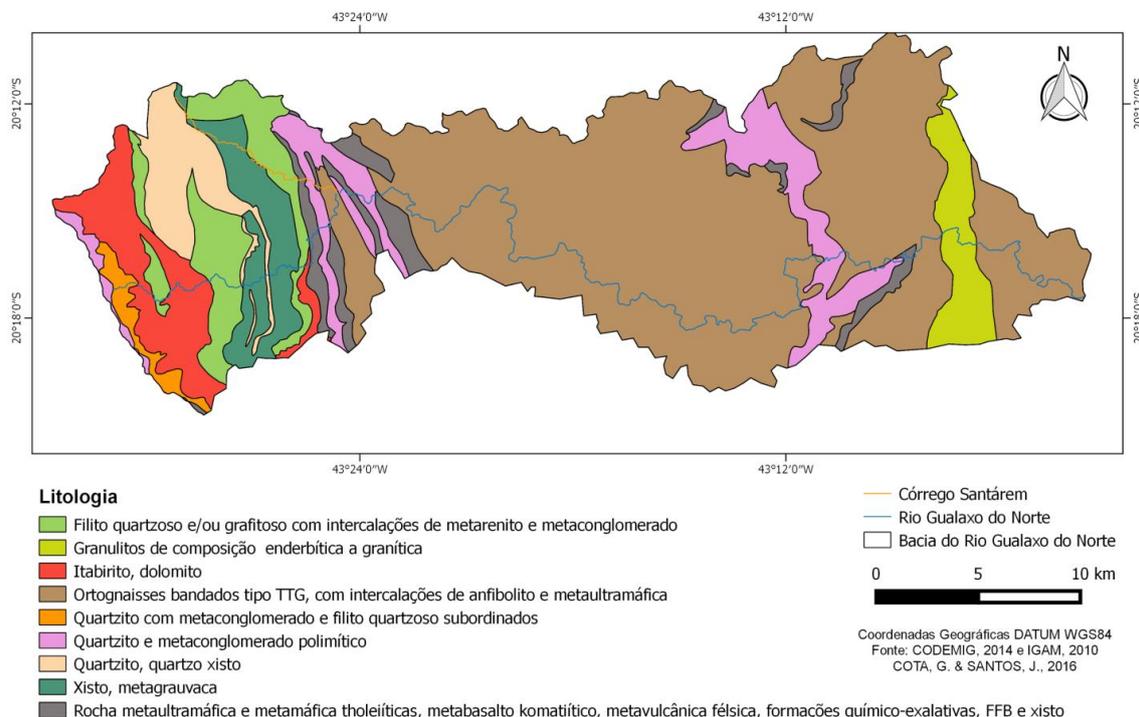
A ocupação de Mariana teve seu início no século XVII, sobretudo devido à atividade de exploração de pedras e minerais preciosos encontrados na

época. A partir do século XX a exploração do minério de ferro se torna um chamariz por empresas internacionais do segmento minerário. Hoje o município de Mariana possui 80% de seu PIB originado da mineração (IBGE, 2010). As demais atividades econômicas da região perpassam por agricultura de subsistência, pecuária, silvicultura, dentre outras. Devido às construções do período barroco e por magníficas paisagens cênicas com a transição do Cerrado para a Mata Atlântica, o turismo é outra atividade de grande impacto econômico para o local (SUPRAM ZM, 2014).

De acordo com o mapa de solos de Minas Gerais (UFV, 2010), em escala de 1:650.000, são três classes distintas de solos presentes na região (Figura 2). A montante da microbacia ocorrem os Cambissolos Háplico Tb Distrófico e Distroférrico que apresentam argila de baixa atividade, sendo o segundo com alto teor de ferro. A classe dos Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos é identificada em áreas com relevo ondulado a suave ondulado. Essa classe apresenta obrigatoriamente um horizonte B textural sob um horizonte A ou E o que afeta a infiltração de água. A terceira classe de solo é Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Há ainda a ocorrência de afloramentos a montante da bacia.

Figura 2. Classes de solo da bacia do rio Gualaxo do Norte.

Em termos litológicos (Figura 3), a bacia abrange rochas do Supergrupo Minas (itabiritos, dolomitos e filitos) em seu alto curso, além de rochas do Supergrupo rio das Velhas (quartzitos e xistos) e do Complexo Santa Bárbara (gnaisses migmatíticos e granitos) no médio curso e rochas do Complexo Acaiaca (gnaisses, quartzitos e migmatitos) e do Complexo Mantiqueira (gnaisses e pegmatitos) em seu baixo curso (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010). É nas áreas pertencentes às rochas do Supergrupo Minas que se encontram diversas minas de minério de ferro e suas respectivas barragens de rejeitos. A barragem de Fundão se insere neste contexto, estando localizada mais precisamente no córrego Santarém, afluente do rio Gualaxo do Norte.

Figura 3. Litologia da bacia do rio Gualaxo do Norte.

Relacionado principalmente à altimetria e sua localização latitudinal, a divisão climática de Köppen desta área é a Cwa, que corresponde ao clima temperado úmido com invernos secos e verões quentes. Segundo as Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 (INMET, 2016) a área de estudo se localiza na porção do país que possui pluviosidade anual média entre 1.250 e 1.450 mm (INMET, 2016).

Aplicação da Análise Multicritério no Mapeamento da Susceptibilidade à Erosão

A utilização da análise multicritério para a elaboração do mapa de susceptibilidade à erosão exigiu a compilação das principais características físicas que compõem o fenômeno estudado. Foram selecionadas as variáveis relativas à litologia, pedologia, declividade e uso e cobertura do solo.

Existem na literatura diversas propostas metodológicas que auxiliam na seleção das variáveis a serem trabalhadas (DIAS et. al., 2003; COHEN et. al., 2005; ROSS, 1994). Para a elaboração dos mapas correspondentes a cada

variável foi utilizado o *software* Quantum Gis em sua versão 2.14.3, sendo utilizados dados vetoriais e matriciais disponíveis em bases de domínio público.

Para a elaboração do mapa pedológico foram utilizados dados das classes de solo na escala 1:650.000 oriundos do mapeamento realizado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) em parceria com a Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM. Foram selecionadas as classes mais representativas de cada metadado tendo seu peso atribuído baseado em seu grau de susceptibilidade aos processos erosivos que, por sua vez, foram estabelecidos seguindo as características de cada classe encontrada em literaturas específicas sobre a temática abordada, como IBGE (2007) e Lepsch (2011).

Os Cambissolos foram pontuados como aqueles que apresentam maior potencial aos processos erosivos, visto que comumente estão localizados em áreas de relevo movimentado e apresentam maior grau de instabilidade frente aos processos de retirada, transporte e deposição dos sedimentos. A classe dos Argissolos foi identificada como a classe com potencial erosivo intermediário por ser uma classe heterogênea. Os Latossolos foram classificados com a menor potencialidade à erosão, pois são os solos mais desenvolvidos e altamente intemperizados. Os afloramentos receberam o menor peso devido à maior resistência a processos denudacionais. Os pesos atribuídos às classes pedológicas constam na Tabela 1.

Tabela 1. Pesos dado às classes pedológicas.

Solos	Peso
Afloramentos	1
Latossolos	2
Argissolos	3
Cambissolos	4

O mapa litológico foi elaborado a partir dos dados do mapeamento realizado em 2014 pela Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM) em parceria com a Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMIG) em escala 1:1.000.000. Para a atribuição de notas referentes a cada classe litológica, seguiu-se a metodologia proposta por MINEROPAR (2006), que atribui valores baseados na vulnerabilidade denudação das rochas (Tabela 2).

Tabela 2. Pesos dado às classes litológicas.

Litologia	Peso
Granulito	1
Itabirito/Dolomito	1
Hortognaisse	1
Quartzito/Filito	1
Formação Ferrífera Bandada/Xisto	1
Quartzito/quartzo/Xisto	2
Filito	4
Quartzito/Metaconglomerado	4
Xisto/ Metagrauvaca	4

Para o mapeamento do uso e cobertura do solo foi utilizado a técnica da classificação supervisionada a partir de uma imagem Landsat 8/OLI obtidas no acervo digital de imagens do INPE (2015) corresponde a 12 de novembro de 2015, um mês após o rompimento da barragem. Esta técnica consiste na escolha de amostras de treinamento para classes que são colhidas no conjunto de bandas de imagens de satélite que melhor atendem os objetivos do estudo. Baseado no trabalho de Souza Filho et al. (2006) foi escolhida a combinação vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio (bandas 4, 5 e 6), por apresentarem melhor contraste espectral na composição colorida. As imagens foram trabalhadas no programa Spring na versão 4.1.1, coordenadas UTM datum WGS 84.

Para melhorar a resolução espacial da imagem Landsat foi utilizado o método de fusão que transformou uma composição colorida (RGB) de imagens multiespectrais com 30m de resolução espacial em componentes IHS – sendo Intensidade (I), matiz (H) e Saturação (S). Posteriormente o componente I foi eliminado sendo substituído por uma imagem pancromática com 15m de resolução espacial. Esse novo esquema (Banda pancromática+H+S) gerou três outras imagens com resolução espacial melhor, porém forçada de 15m (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Após a fusão das imagens foi realizada a classificação supervisionada pelo método MaxVer em que foi designado as seguintes classes: Corpo hídrico, Lama, Vegetação arbórea, Vegetação rasteira, Agropecuária, Área urbanizada e Solo exposto. Os pesos dados baseado no potencial erosivo de cada subclasse constam na Tabela 3.

Tabela 3. Peso dado às classes de uso e cobertura da terra.

Classe	Peso
Corpo hídrico	1
Vegetação arbórea	2
Área urbanizada	2
Vegetação rasteira	3
Solo exposto	4
Agropecuária	4
Lama	5

Para a variável declividade foram utilizados dados em formato matricial do projeto TOPODATA, lançado em 2008 pelo INPE. Os dados da missão Shuttle Radar Topography Mission Radar Topography Mission (SRTM), de resolução espacial de 90 m, foram refinados pelo projeto TOPODATA, gerando um produto final de resolução de 30m para a América do Sul. A partir destes dados matriciais foi elaborado o Modelo Numérico do Terreno (MNT), extraída as curvas de nível da bacia e gerada as classes de declividade.

Na elaboração do raster de declividade foi utilizada a proposta metodológica elaborada por Ross (1994) que visa o estabelecimento de cinco classes de declividade tendo como base a hierarquização pelos índices de dissecação do relevo e a susceptibilidade aos processos erosivos e de movimentos de massa. Os pesos dados de cada classe estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4. Peso dado às classes de declividade.

Classe	Peso
Muito fraca	1
Fraca	2
Média	3
Forte	4
Muito Forte	5

Após o estabelecimento dos atributos trabalhados, foram atribuídos graus de importância para cada variável de acordo com o fenômeno estudado, dando diferentes graus de relevância em termos de erosão para cada uma.

O método utilizado na análise das relações entre as variáveis foi o AHP. A relação entre os critérios foi decomposta e sintetizada para obter a priorização de uma variável em detrimento de outra. Deste modo, os fatores foram comparados aos pares, permitindo que cada relação receba um peso de acordo com o seu grau de importância (GOMES et al., 2004).

Para comparação das variáveis com os seus pares para determinar o valor de prioridade utilizou a Escala Fundamental de Saaty (Tabela 5), que por sua vez, varia de 1 a 9.

Tabela 5. Escala Fundamental de Saaty.

Valor	Prioridade	Características
1	Igualmente Importante	Os dois elementos de juízo contribuem igualmente para o objetivo.
3	Levemente Importante	A experiência e o julgamento favorecem um elemento em relação ao outro.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um elemento em relação ao outro.
7	Importância muito Grande ou Demonstrada	Um elemento de juízo é muito fortemente favorecido em relação ao outro; sua dominação de importância pode ser demonstrada na prática.
9	Extremamente Importante	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra, sua dominação de importância é demonstrada na prática.
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Para a organização de cada variável em uma hierarquia foi gerada uma matriz quadrada recíproca, também conhecida como Matriz Dominante (Tabela 6).

Tabela 6. Matriz Dominante.

Variáveis	Solos	Litologia	Cobertura do Solo	Declividade	Autovalor
Solos	1	4	1/7	1	13,24%
Litologia	¼	1	1/9	1/5	4,524%
Cobertura do Solo	7	9	1	7	67,68%
Declividade	1	5	1/7	1	14,556%
Total	9,25	19	1,39683	9,2	100%

Após a hierarquização das variáveis, foi feita a modelagem matemática dos dados utilizando o *software* ArcGIS, em sua versão 10.1, para a geração da carta de susceptibilidade à erosão. Respeitando os graus de importância de cada variável e os respectivos pesos de cada classe foi feita a álgebra de mapas que teve como resultado o mapa de susceptibilidade erosiva da bacia do rio Gualaxo do Norte.

Resultados e discussão

No mapeamento do uso e cobertura do solo, a maior parte da bacia apresentou a classe “vegetação rasteira” (Figura 4). A classe “solo exposto” compreende a cabeceira da bacia onde estão inseridas diversas atividades minerárias. A “lama” foi identificada como o sedimento depositado principalmente às margens do curso d’água. Pela classificação foi possível observar que esta classe está presente ao longo do corpo hídrico do rio Gualaxo do Norte com mais intensidade em alguns pontos. Esse sedimento disposto pelo rompimento da barragem não possui estrutura, tendo assim baixa agregação, contribuindo para a atuação dos processos erosivos (VIANA e COSTA, 2016).

Em algumas partes do rio Gualaxo do Norte foi possível a identificação da classe “corpo hídrico”. Essa classe corresponde à hidrografia passível de assimilação com menor concentração de sedimentos. As classes “agropecuária” e “área urbanizada” foram as classes que apresentaram maior índice de confusão entre si (Figura 4). Isso se deve, principalmente, pela semelhança da resposta espectral dos pixels presentes nas áreas correspondentes a essas classes.

A declividade foi classificada conforme metodologia proposta por Ross (1994). Dessa forma, a classe “muito forte” é mais expressiva a leste, na cabeceira da bacia. No entanto, aparece em pequenos pontos da área de estudo (Figura 5). Isto ocorre devido ao relevo movimentado presente na região. As

cotas variam de 1.350 m de altitude a montante e atingem valores entre 550 e 750 m a jusante.

Figura 4. Mapa de Uso e Cobertura do solo da bacia do rio Gualaxo do Norte-MG.

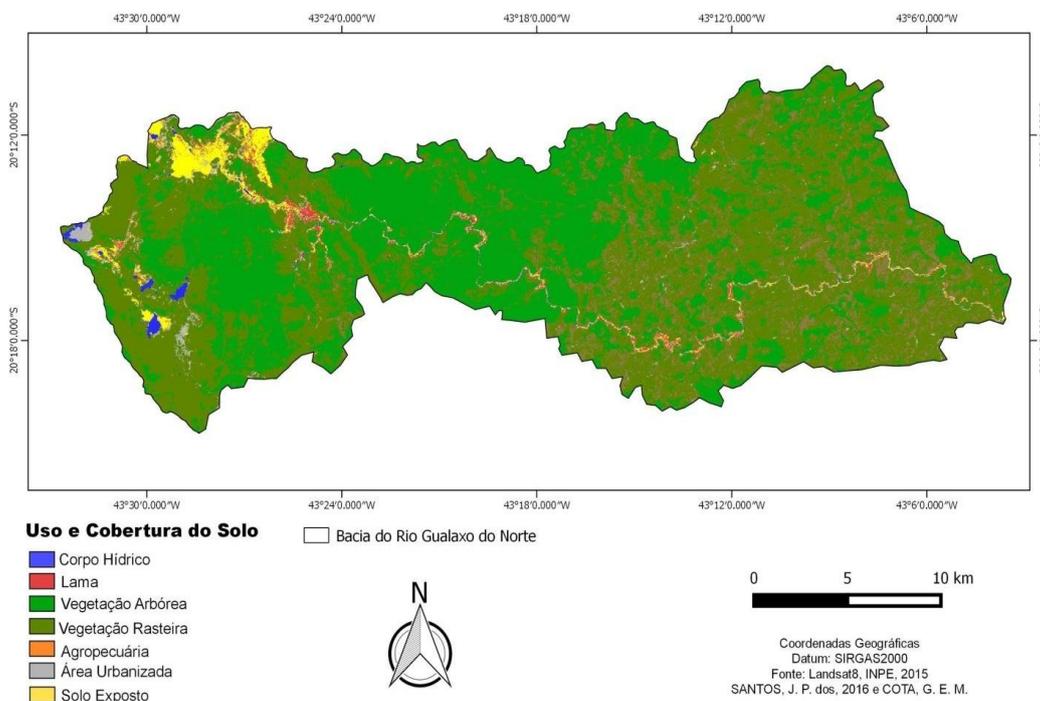
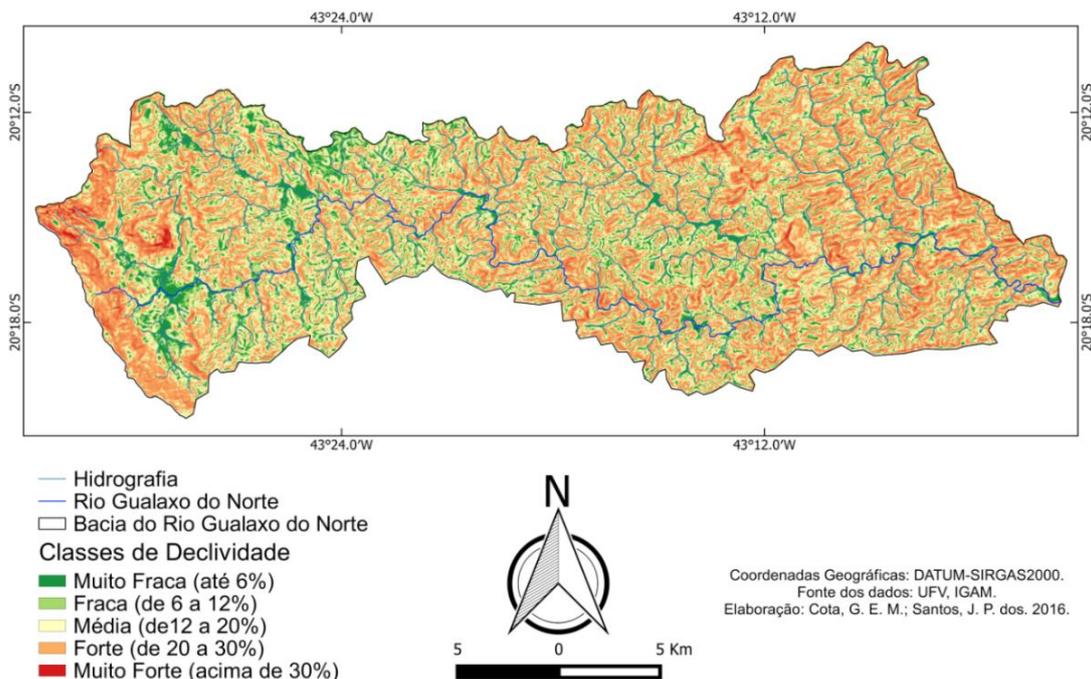
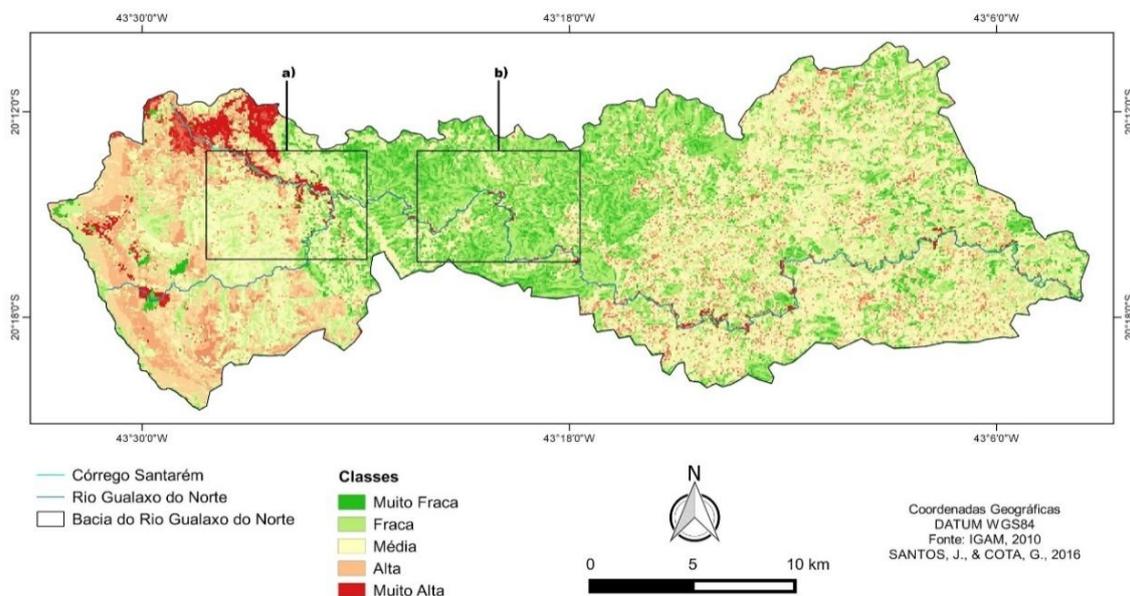


Figura 5. Classes de declividade para a bacia do rio Gualaxo do Norte.



O mapa de susceptibilidade à erosão, apresentado na Figura 6, revela o contexto de um modelo de susceptibilidade erosiva da bacia. Para facilitar a visualização e análise foram destacadas duas áreas na calha do rio Gualaxo do Norte. A área “a” se localiza na confluência do córrego Santarém com o rio Gualaxo do Norte onde se encontrava a comunidade de Bento Rodrigues e a área “b” se localiza na porção mais central da bacia.

Figura 6. Susceptibilidade à erosão na Bacia do rio Gualaxo do Norte-MG.



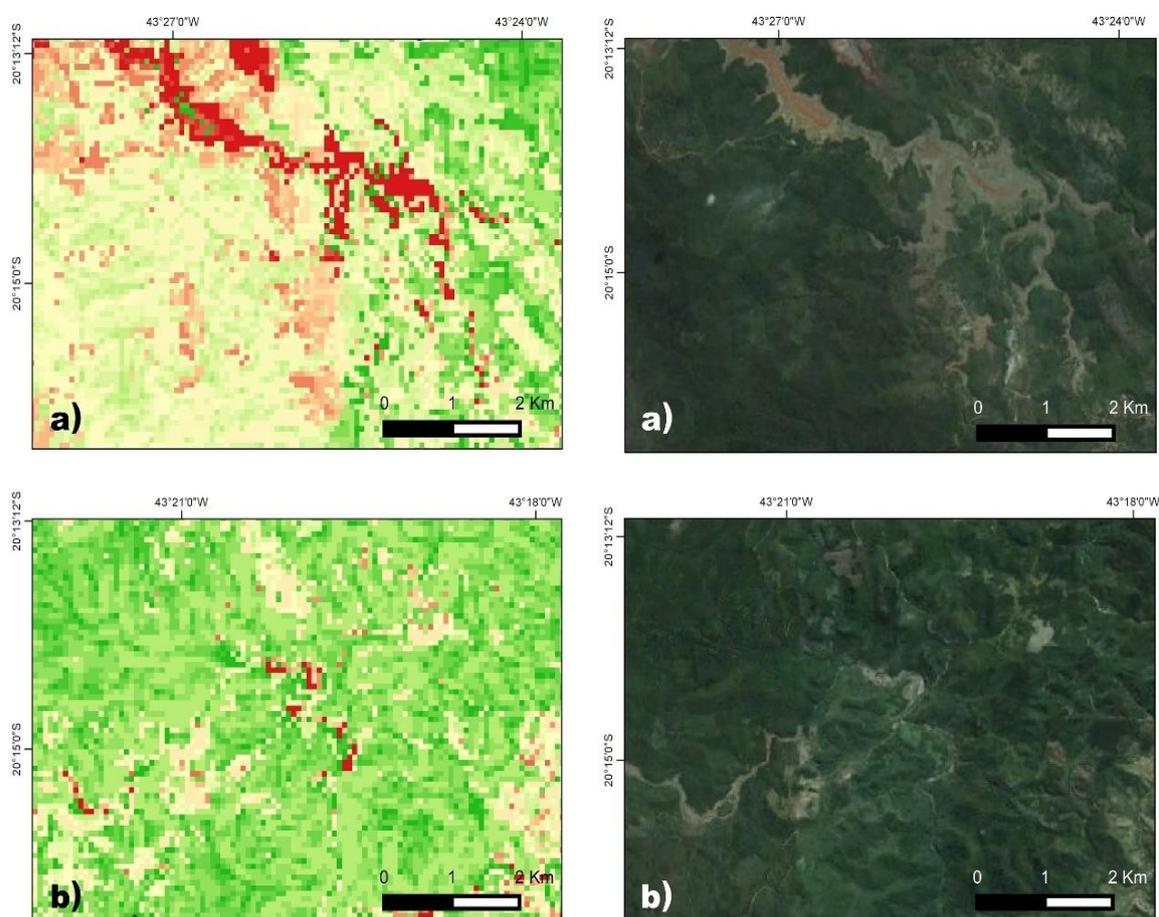
As áreas “Muito Fraca” e “Fraca” são aquelas que apresentaram primordialmente uso e cobertura de terra composto por vegetação arbórea e na classificação pedológica Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Figura 2). Este solo é profundo, normalmente poroso e bem estruturado, favorecendo a infiltração de água (EMBRAPA, 1979).

Já as áreas identificadas com classe “Média” apresentam uso e cobertura do solo composto por vegetação rasteira e agropecuária, assim como os Cambissolos como classe de solos (Figura 2). A agropecuária é uma atividade intensa para toda a bacia do rio Doce, impactando de forma direta nas propriedades físicas do solo e no ecossistema como um todo.

As classes “Forte” e “Muito Forte” foram determinadas, sobretudo, pela declividade e presença de lama na calha do rio Gualaxo do Norte. Na Figura

7 são observados os pontos escolhidos para análise de antes e depois do rompimento da barragem. Na área A, nota-se o extravasamento dos sedimentos a partir da barragem de Fundão. Esse depósito, por não ser de sedimentos consolidados e estarem em área de gradiente altimétrico de grande variação, torna a susceptibilidade à erosão elevada. No que tange à área B, é possível verificar as áreas de solos expostos que também foram identificadas em imagens anteriores ao desastre.

Figura 7. Comparativo das áreas que apresentaram alta susceptibilidade à erosão próximo ao rio Gualaxo do Norte-MG.



Fonte: Google Earth (2016).

Além dos distúrbios imediatos após o rompimento da barragem, a estabilização do rejeito de minério, sobretudo nas planícies e terraços fluviais, formou uma nova camada superficial. Os Argissolos, Cambissolos e Latossolos, na maioria eutróficos, presentes ali foram substituídos por um

material estéril composto principalmente por areia, silte e argila, alterando as características pedológicas das áreas afetadas, mediante pesquisas sobre a historicidade do local (SCHAEFER et al., 2016).

Essa nova configuração pode ter representado para a bacia, em termos de susceptibilidade à erosão, uma nova disposição de focos erosivos, principalmente pela desagregação das partículas mais finas provenientes do material sem estrutura e friável colmatado nas planícies e terraços fluviais. Deste modo, os cenários de turbidez das águas são agravados não só pela presença do rejeito nas calhas fluviais, mas também pelo carreamento do material depositado nas áreas adjacentes para os fundos de vale ocasionando forte impacto na morfologia do canal e na biota aquática.

A ausência de uma zona de amortecimento que impede que esse material seja carreado diretamente para os cursos d'água potencializa ainda mais os efeitos do rompimento da barragem para a bacia. Assim, fenômenos como erosão laminar e concentrada são potencializados, sendo que a última pode gerar fenômenos erosivos mais intensos como ravinas, sulcos e até mesmo voçorocas (Figura 8).

Figura 8. Carreamento do material superficial em direção aos rios.



Fonte: Viana e Costa (2016).

A presença do rejeito de minério recobrando o solo restringe seu uso agrícola devido a sua baixa fertilidade, associada ao material instável e pouco resistente que também dificulta outras formas de uso e ocupação do solo (UFMG e UFJF, 2016). Cabe destacar que estudos multidisciplinares somados a esta análise podem contribuir com os projetos de manejo e conservação de bacias, possibilitando melhor compreensão dos fenômenos que nela ocorrem.

O uso de mapeamento semelhante é útil para planejadores pensarem o uso do solo a partir de suas capacidades de preservação. A vulnerabilidade ambiental está estritamente relacionada à suscetibilidade à erosão e ambientes com alto índice necessitam de planejamento estratégico para que sejam evitados a amplificação de impactos em caso de desastres ambientais.

É necessário, ainda, repensar o papel da mineração para o Estado de Minas Gerais no que diz respeito aos impactos ambientais, que permanecem mesmo após o descomissionamento das minas. É inegável que a mineração de maneira geral, sobretudo no Quadrilátero Ferrífero, possui enorme importância em termos econômicos para o Estado e para os municípios no qual fazem parte. No entanto, os passivos socioambientais que, por vezes, podem ser gerados, não justificam os benefícios que a mineração pode trazer. Este é o caso do rompimento da barragem de Fundão que vitimou pessoas e trouxe danos sociais irreparáveis, além de ter comprometido toda a dinâmica ambiental do rio Doce e de vários de seus tributários.

Considerações finais

Com intuito de compor mais peso na análise de susceptibilidade à erosão é necessário à realização de mapeamentos também em datas anteriores para a criação de um banco de dados sobre a evolução e alterações ocorridas.

A utilização de ferramentas disponíveis gratuitamente como as imagens provenientes do satélite Landsat 8 se mostram eficientes em relação ao objetivo proposto. Entretanto, para estudos futuros recomenda-se o uso de imagens de satélite com resolução espacial superior para o mapeamento do uso e cobertura

do solo, visando resultados mais apurados, sendo que o uso e cobertura do solo é a classe que mais potencializou os resultados obtidos.

O mapeamento final está sujeito aos dados na escala disponível, podendo não representar a resolução adequada para um mapeamento de maior precisão. Para isso, estudos posteriores devem visar uma compilação de dados com maior precisão, de modo a se tornar mais efetiva e precisa as áreas mais afetadas e, conseqüentemente, um diagnóstico do quadro de susceptibilidade à erosão na bacia do rio Gualaxo do Norte-MG.

O acidente ocorrido em Mariana apresenta impactos dos mais diversos para a fauna, flora, solo, hidrografia, além de aspectos socioeconômicos. Todavia, sua importância para gestores ambientais possibilitam uma leitura para além do convencional, dando um quadro dos impactos do rompimento para toda a bacia e não somente em alguns trechos. Sua incorporação, no planejamento territorial e em planos de recuperação ambiental da bacia, é de grande valia para se refletir sobre os tipos de manejos das atividades humanas, sejam elas urbanas, agropecuárias e/ou minerárias, sobretudo a última que possui forte histórico de degradação ambiental para toda a região do Quadrilátero Ferrífero.

Referências bibliográficas

- AB'SÁBER, A. N. **Domínios morfoclimáticos e províncias fitogeográficas no Brasil. Orientação.** São Paulo: USP/Igeog, n. 3, 1967.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura.** Brasília: Embrapa, SPI; Embrapa, CPAC, 1998. p. 3-11.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; MEDEIROS, J. S. Geoprocessamento para projetos ambientais. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 289-324.
- COHEN, M. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. **Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed.** *Geoderma*, Amsterdã, v. 124, n. 3, p. 235-252, fev. 2005. Disponível em

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670610400117X>>. Acesso em 18 de jul. de 2017.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **PARH - Plano de ação de recursos hídricos da unidade de planejamento e gestão DO1**. [S.l.: s.n.]. 2010. 124 p.

CORSEUIL, C. W. **Técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios na adequação de uso das terras**. 2006. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

DIAS, J. E.; GOMES, O. V. O.; GOES, M. H. B. **Áreas de riscos de enchentes no município de volta redonda: uma aplicação por geoprocessamento**. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 2, n. 10, p. 13-25, set. 2003.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço nacional de levantamento e conservação de solos**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos/Embrapa-SNLCS. Micelânea, 1, 1979. 83 p.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisão em cenários complexos: Introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 168 p.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. 3º ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2011. 509 p.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2º ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p.

IBGE. **Minas Gerais - Mariana**. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística: Brasília, 2010. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=314000>>. Acesso em 28 de março de 2016.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV. 2012. 415 p.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Instituto Nacional de Meteorologia: Brasília, 2016. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em 25 de junho de 2016.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

MALCZEWSKI, J. **GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview**. Progress in Planning, Amsterdã, v. 62, n. 1, p. 3-65, jul. 2004. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305900603000801>>. Acesso em 18 de jul. de 2017.

MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná. **Potencialidades e fragilidades das rochas do estado do Paraná**. Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Paraná, 2006. 66 p.

- PINTO-COELHO, R. M. **Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG)**. Belo Horizonte: Arquivos do Museu de História Natural - UFMG, v. 24, n° 1, 2015.16-43 p.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 63-74, fev.1994. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
- ROY, B. **Multicriteria methodology for decision aiding**. Dordrecht: Springer US, 1996. 293 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>
- SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Amsterdãv.15, n. 3, p. 234–281, jun. 1977. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022249677900335>>. Acesso em 18 de jul. de 2017.
- SAATY, T. L. **The analytical hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.
- SAITO, S. **Estudo analítico da suscetibilidade a escorregamentos e quedas de blocos no maciço central de Florianópolis – SC**. 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E.; FILHO, E. I. F.; ASSIS, I. R. **Paisagens de lama: Os tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 42, n. 1, p. 18-23, jan-abri. 2016.
- SOUZA FILHO, P. W. M. E.; PARADELLA, W. R.; SOUZA JÚNIOR, C.; VALERIANO, D. M.; MIRANDA, F. P. Sensoriamento remoto e recursos naturais da Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 58, n. 3, p. 37-41, jul-set. 2006.
- SUPRAM, Z. M. **Parecer técnico supram – zm N°: 0201538/2011**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2014. Não paginado..UFMG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS; UFJF – UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **A tragédia do rio Doce - a lama, o povo e a água**. Belo Horizonte, Juiz de Fora: Relatório da Expedição do rio Doce, 2016. 27 p.
- UFV. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Escala 1:650.000. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010. Disponível em <http://www.dps.ufv.br/?page_id=742>. Acesso em 01 de maio de 2017.
- VIANA, J. H. M.; COSTA, A. M. **A Ciência do solo como instrumento para a recuperação das áreas afetadas pelo desastre de Mariana dos solos na bacia do rio**

Doce. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 42, n. 1, p. 24-27, jan-abr. 2016.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses:** a guide to conservation planning. Washington: USDA, Agriculture handbook, 1978. 57 p.

Data de submissão: 09/05/2017. Data de aceite: 27/07/2017.