



ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS PEDRAS – MG

DOI: 10.19177/rgsa.v8e12019563-581

Emanuelle Zordan de Melo¹, Yara Cristina Batista de Sousa²
Thaís Martins Marrama³, Hudson de Paula Carvalho⁴

RESUMO

O presente estudo objetivou validar um Índice de Vulnerabilidade do Solo a partir de informações de “tipo”, “uso” e “declividade” do solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras, em Uberlândia-MG, com o auxílio de técnicas de Geoprocessamento e uso do software ArcGis versão 10.3. Os resultados obtidos foram ponderados seguindo a metodologia proposta por Crepani (1996), resultando um mapa final discriminado em cinco classes de vulnerabilidade: Estável, Moderadamente Estável, Medianamente Estável, Moderadamente Vulnerável e Vulnerável. Destacou-se o predomínio da classe Medianamente Estável ao longo da bacia (55,3%) e a ocorrência de áreas mais vulneráveis na região do baixo curso da mesma, a partir da associação entre solos mais jovens, declividades mais intensas e usos agrossilvipastoris. Pôde-se concluir que a utilização de técnicas de geoprocessamento se mostrou adequada para executar a análise de vulnerabilidade no âmbito de bacias hidrográficas. Ademais, a bacia em estudo pode ser considerada estável, sendo que nas áreas em que predominam as classes mais vulneráveis, faz-se necessário o direcionamento prioritário de ações de recuperação e conservação por parte dos agentes que atuam na bacia.

Palavras-Chave: Gestão de bacias. SIG. Solos.

¹ Engenheira Ambiental, Mestranda em Qualidade Ambiental - PPGMQ, Universidade Federal de Uberlândia – UFU. E-mail: emanuellezm@gmail.com

² Historiadora, Mestranda em Qualidade Ambiental - PPGMQ, Universidade Federal de Uberlândia – UFU. E-mail: yaracristina1982@gmail.com

³ Bióloga, Mestranda em Qualidade Ambiental - PPGMQ, Universidade Federal de Uberlândia – UFU. E-mail: thais_martinsmarrama@hotmail.com

⁴ Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia (2002), mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (2004) e doutorado em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (2008). Atualmente é professor efetivo da Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: HUDSONPC@UFU.BR >< <https://orcid.org/0000-0003-3020-1914>

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem se observado a crescente preocupação com o meio ambiente e a degradação do solo, devido às más condições ambientais e a busca por maior qualidade de vida das pessoas. Há então a necessidade não só de se realizar melhor gestão do uso do solo e dos recursos hídricos, como também “buscar um estudo do grau de fragilidade dos diversos ambientes às interferências antrópicas” (ROVANI et al., 2015).

Estudos de avaliação dos esforços de conservação mostraram que as melhores práticas de gestão nem sempre foram implementadas nas áreas mais vulneráveis, onde são mais necessárias. Enquanto complexos modelos de simulação computacional podem ser usados para identificar essas áreas, os recursos necessários para usar tais modelos não possuem boa aplicação em grande parte dos recursos hídricos gerenciados. Nesse sentido, técnicos que atuam com a conservação do solo e da água precisam de ferramentas simples e espacialmente explícitas como um Índice de Vulnerabilidade do Solo. Tais índices, fundamentados na técnica de geoprocessamento, permitem avaliar a fragilidade inerente aos solos e o risco que representam para a qualidade da água, quando aplicados para o cultivo de culturas em linha, por exemplo (CHANROBERT et al., 2017).

A bacia hidrográfica consiste em uma unidade básica de um sistema ecológico. Questões relacionadas à vulnerabilidade do solo, especificamente em bacias, apesar de ocorrerem também como um processo natural, tem-se agravado no decorrer dos últimos anos, principalmente devido às ações antrópicas. Além disso, a bacia hidrográfica compreende uma unidade geomórfica independente, que possui características sistemáticas e independentes. No campo de conservação de água e solo, uma bacia hidrográfica geralmente se refere a uma unidade de erosão (CHEN E ZHA, 2016). A erosão do solo é um processo que ocorre naturalmente e é um fenômeno geológico normal, associado ao ciclo hidrológico. Ademais, pode ser considerado também, como um processo gradual que ocorre quando o impacto da água separa e remove partículas do solo causando a deterioração do solo (FARIA et al., 2003; SILVA et al., 2013; CORRÊA et al., 2015; EL JAZOULI et al., 2017).

A vulnerabilidade do solo à erosão pode ser indicada por parâmetros físicos e químicos, assim como por processos biológicos e antropogênicos (MORGAN, 1995; COSTA et al., 2008; SOUZA; GALVANI, 2017). Os impactos provocados pela erosão do solo se expressam direta e indiretamente, como a perda de fertilidade e estrutura do solo, o assoreamento e a contaminação da água e do solo, a redução da biodiversidade, dentre outros (COSTA et al., 2008; LEPSCH, 2010; DIAS; SILVA, 2015). Segundo Marandola Jr. e Hogan (2013), apesar de muito utilizado, o conceito de vulnerabilidade ainda está em formação e por isso, apresenta-se pouco preciso. Ainda segundo esses autores, este conceito está mais associado à possibilidade de solução dos danos ou recuperação dos mesmos.

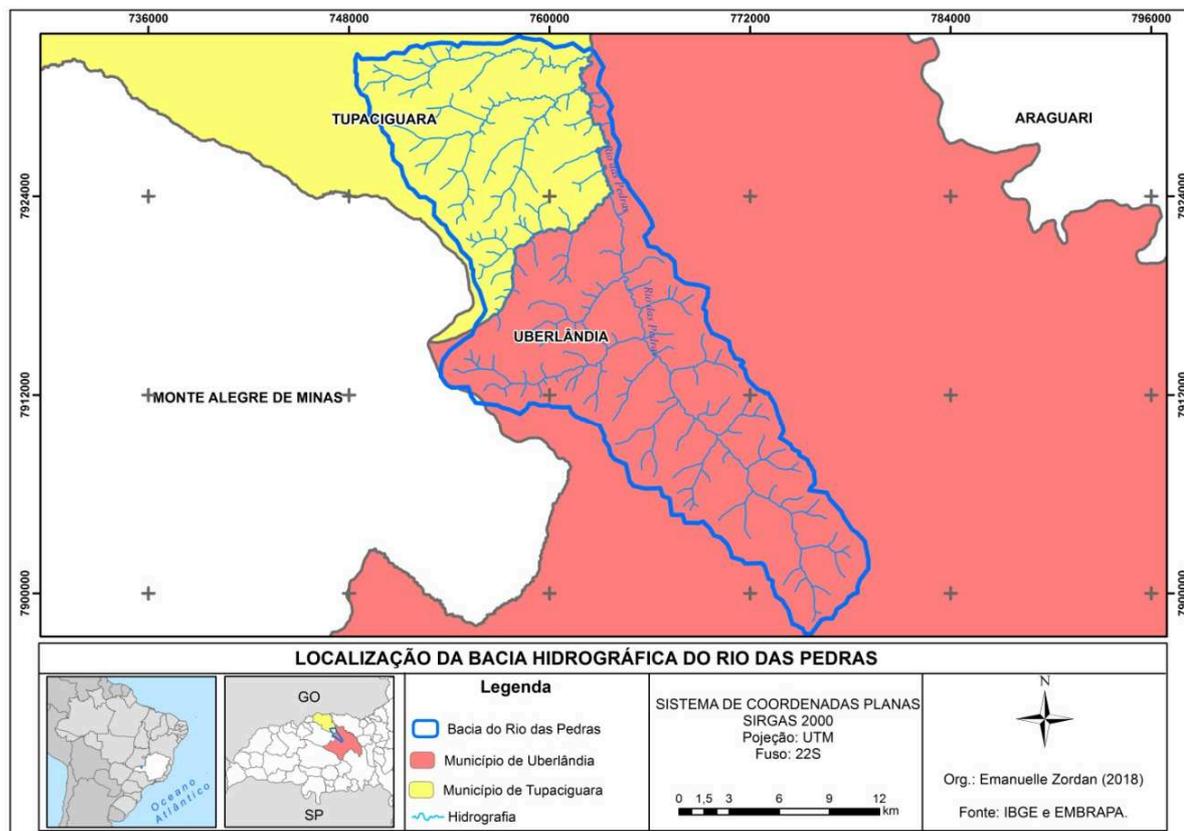
Sendo assim, o desenvolvimento de trabalhos que visem testar metodologias relacionadas à vulnerabilidade do solo em bacias hidrográficas, como a presente pesquisa, se reveste de grande importância, pois essa técnica pode se transformar em uma importante ferramenta de gestão do ambiente, principalmente para os comitês de bacias hidrográficas.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi obter o mapa temático de vulnerabilidade do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras, localizada no Estado de Minas Gerais, por meio de informações relacionadas ao tipo, uso e declividade do solo, utilizando ferramentas de geoprocessamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras encontra-se localizada na Mesorregião Geográfica Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 18°41'5,78" a 18°59'46,59" de latitude Sul e 48°38'36,78" a 48°22'55,49" de longitude Oeste. Esta bacia ocupa uma área aproximada de 420 km², abrangendo terras dos municípios de Uberlândia (64% da área da bacia) e Tupaciguara (36% restante) (Figura 1).

Figura 1 - Localização e delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras.



O Rio das Pedras, cujas nascentes estão localizadas na área urbana do município de Uberlândia a uma altitude aproximada de 850 metros, trespassa a parte central desse município no sentido sudeste-noroeste em uma extensão de cerca de 90 km. Possui como principais afluentes os ribeirões Cajuru, Barreiro e Galheiros e o Córrego da Conceição, todos pela margem esquerda.

O Rio das Pedras é o principal rio da bacia, do qual ela ganha a denominação. O referido rio deságua no baixo curso do Rio Uberabinha pela margem esquerda e este, por sua vez, é afluente do Rio Araguari, o qual é tributário do Rio Paranaíba, um dos formadores do Rio Paraná. Portanto, a bacia hidrográfica do Rio das Pedras, objeto deste estudo, é uma sub-bacia da Bacia do Paraná.

O clima dos municípios de Uberlândia e Tupaciguara é considerado tropical, apresentando estações seca e chuvosa bem definidas, sendo classificado como Aw de acordo com Köppen e Geiger (SÁ JÚNIOR, 2009). Segundo Ribeiro e Walter

(2008), a vegetação predominante nos referidos municípios na área da bacia em estudo, compreendem o bioma Cerrado.

Para a realização deste trabalho foram utilizados como materiais de apoio o Modelo Digital de Elevação - MDE, com resolução espacial de 90 metros, em articulação compatível com a escala 1:250.000, fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Monitoramento por Satélite; arquivos vetoriais (*shapefiles*) contendo os dados geoespaciais a serem trabalhados em ambiente SIG, advindos de bancos de dados pré-existent, disponibilizados por: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Zoneamento Ecológico e Econômico de Minas Gerais – ZEE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG. Para tanto, os dados obtidos foram trabalhados em *software* ArcGIS® versão 10.3, desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute* - ESRI, objetivando o processamento das informações e a obtenção dos mapas de interesse.

Inicialmente, foi realizada a delimitação do polígono referente à Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras, utilizando-se o conjunto de ferramentas para análises hidrológicas no ArcGis, por meio da função *Hydrology*. A partir do MDE (SE-22-Z-B), disponibilizado pela EMBRAPA (<http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/mg/mg.htm>), a seguinte sequência de ferramentas foi utilizada no *software*: *Fill* (Correção de pixels) > *FlowDirection* (Direção de fluxo) > *FlowAccumulation* (Fluxo acumulado) > *FlowLenght* (Comprimento do fluxo) > *Streamorder* (Hierarquia dos rios), utilizando-se o método de STRAHLER > *Con*¹ (Condicional - teste lógico) > *Streamtofeature* (Transformação de dados matriciais para vetoriais) > *Watershed* (Bacia) > *ConversionTools (FromRastertoPolygon)*.

Para avaliar a vulnerabilidade à perda de solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras, foi realizada uma adaptação da metodologia proposta por Crepani et. al. (1996), sendo elencados três fatores influenciadores na ocorrência de processos erosivos: declividade do solo, tipos de solo e uso e ocupação do solo. Posteriormente, foram elaborados os mapas temáticos para cada fator, sendo os arquivos vetoriais obtidos recortados aos limites geográficos da citada bacia e em seguida, convertidos em arquivos matriciais através da atribuição de pesos a cada classe obtida.

¹ Ferramenta localizada na aba *SpatialAnalyst Tools* > *Conditional* > *Con*.

Foram atribuídos no SIG valores variando entre "1,0" e "3,0", conforme metodologia citada, levando-se em consideração a vulnerabilidade de cada classe analisada em relação à perda de solo, por meio da ferramenta de reclassificação "Reclassify". As classes mais estáveis em relação à perda de solo receberam valores próximos a 1,0 e aquelas menos estáveis valores próximos a 3,0. Para as classes intermediárias adotou-se valores próximos a 2,0.

Por fim, haja vista que os três fatores elencados para a análise da vulnerabilidade da bacia não agem sozinhos, mas sim em conjunto, todas as informações foram integradas no *software* por meio da álgebra de mapas (*Raster Calculator*), subsidiando a elaboração do mapa final de susceptibilidade à erosão, a partir da média aritmética entre os fatores influenciadores de processos erosivos, conforme explicitado na Equação 1.

$$SEb = \frac{SEd+SEs+SEu}{3} \quad (1)$$

Onde: SEb - Susceptibilidade à Erosão na bacia, adimensional; SEd - Susceptibilidade à Erosão do fator declividade, adimensional; SEs - Susceptibilidade à Erosão do fator tipologia de solos, adimensional; SEu - Susceptibilidade à erosão do fator uso e ocupação do solo, adimensional.

No mapa final, as classes de estabilidade e vulnerabilidade à perda de solo na bacia hidrográfica foram definidas de acordo com a Tabela 1. A representação da vulnerabilidade e/ou estabilidade da bacia também seguiu a proposta de Crepani et al. (1996), variando em uma escala RGB conforme explicitado na Tabela 2.

Tabela 1 - Intervalos de classe de vulnerabilidade à perda de solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras

NOMENCLATURA	INTERVALO
Estável	1,0
Moderadamente Estável	1,0001 - 1,5
Medianamente Estável	1,5001 - 2,0
Moderadamente Vulnerável	2,0001 - 2,5
Vulnerável	2,5001 - 3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (1996)

Tabela 2 - Escala de coloração (RGB) adotada para o mapa de vulnerabilidade à perda de solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras

CLASSE	VERMELHO	VERDE	AZUL	CORES
--------	----------	-------	------	-------

Estável	0	0	255	
Moderadamente Estável	0	255	255	
Medianamente Estável	0	255	0	
Moderadamente Vulnerável	255	255	0	
Vulnerável	255	0	0	

Fonte: Crepani et al. (1996)

2.1 Obtenção do mapa de declividade

A declividade consiste na inclinação da superfície do terreno tendo em consideração a horizontal, ou seja, a variação de altitude entre dois pontos do terreno, em relação à distância que os separa. Para obtenção do mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras foi utilizado o MDE (SE-22-Z-B), disponibilizado pela EMBRAPA (MIRANDA, 2005), aplicando-se a ferramenta "Slope" no *software* ArcGIS. Como os mapas utilizados neste trabalho se apresentavam em coordenadas planas (métricas), foi escolhida a porcentagem como unidade da declividade do solo e não o grau. As classes de declividade obtidas foram reclassificadas em cinco intervalos distintos, sugeridos por Embrapa (1979), conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da declividade do solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras (Adaptado de Embrapa (1979))

DECLIVIDADE DO SOLO (%)	CLASSIFICAÇÃO
0 - 3	Relevo plano
3 - 8	Relevo suave ondulado
8 - 20	Relevo ondulado
20 - 45	Relevo forte ondulado
> 45	Relevo montanhoso ou escarpado

No que tange à atribuição de pesos, as classes menos declivosas receberam valores menores, apresentando-se menos susceptíveis à perda de solo ao longo da bacia. Por outro lado, as classes com declividades mais acentuadas receberam valores maiores por apresentarem-se mais susceptíveis à erosão (Tabela 4).

Tabela 4 - Atribuição de pesos às classes de declividade do solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras

CLASSE DECLIVIDADE DO SOLO	PESO
Plano (0 - 3%)	1,0
Suave ondulado (3 - 8%)	1,5
Ondulado (8 - 20%)	2,0

Forte ondulado (20 - 45%)	2,5
Montanhoso ou escarpado (>45%)	3,0

2.2 Obtenção do mapa de tipos de solos

Para elaboração do mapa de tipologia de solos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras, foi utilizado como base o Mapa de Reconhecimento de Solos do Triângulo Mineiro, disponibilizado pela EPAMIG (1980), em formato *.jpeg*, na escala 1.500.000. A vetorização foi realizada em tela, por meio do *software* ArcGis, para delimitação dos polígonos de cada classe de solo. A legenda do mapa gerado foi correlacionada com a nomenclatura atualizada, proposta pela EMBRAPA (2013), conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Correlação entre a legenda proposta por EPAMIG (1980) e atualizada pela EMBRAPA (2013)

NOMENCLATURA EPAMIG (1980)	NOMENCLATURA EMBRAPA (2013)
LEa1 - Latossolo Vermelho-Escuro Álico	LVd1 - Latossolo Vermelho Distrófico
LEa3 - Latossolo Vermelho-Escuro Álico	LVd2 - Latossolos Vermelhos Distróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos
LEa2 - Latossolo Vermelho-Escuro Álico + Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico	LVdf2 - Latossolos Vermelhos Distroféricos + Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos
LRd4 - Latossolo Roxo Distrófico ou Álico + Cambissolo Eutrófico	LVAd - Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos
LVa1 - Latossolo Vermelho-Amarelo Álico ou Distrófico	LVef2 - Latossolos Vermelhos Eutroféricos + Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos
LRe2 - Latossolo Roxo Eutrófico + Cambissolo Eutrófico + Solos Litólicos Eutróficos	

Nos termos da atribuição de pesos, observou-se a maturidade como característica para estabelecer a vulnerabilidade das classes de solo obtidas, de forma que para solos e/ou associações mais maduras, com o predomínio de Latossolos, foram atribuídos valores próximos à estabilidade (1,0) e, valores próximos à vulnerabilidade (3,0) foram dados para formações mais jovens. Para solos e/ou associações intermediárias foram atribuídos valores medianos (em torno de 2,0), conforme explicitado na Tabela 6.

Tabela 6 - Atribuição de pesos às classes de solos encontradas na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras

CLASSE DE SOLOS	PESO
-----------------	------

Latossolo Vermelho Distrófico	1,0
Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos	1,5
Latossolos Vermelhos Distróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	2,0
Latossolos Vermelhos Distroféricos + CambissolosHáplicos Tb Eutróficos	2,5
Latossolos Vermelhos Eutroféricos + CambissolosHáplicos Tb Eutróficos + NeossolosLitólicosEutróficos	3,0

2.3 Obtenção do mapa de uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras foi gerado a partir de uma adaptação do arquivo *shapefile* disponibilizado pelo projeto Terra Class Cerrado (2015), no qual foram utilizadas imagens do satélite Landsat-8, sensor OLI, referentes ao período seco do ano de 2013. No que diz respeito à atribuição de pesos (Tabela 7), foi observado o parâmetro relacionado à densidade da cobertura vegetal, onde áreas nativas com densa cobertura vegetal receberam valores de estabilidade (1,0), enquanto áreas com constantes modificações em sua cobertura receberam valores de vulnerabilidade (3,0). Em relação às áreas relativamente estáveis e impermeabilizadas, foram atribuídos valores intermediários (em torno de 2,0).

Tabela 7 - Atribuição de pesos às classes de uso e ocupação do solo obtidas na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras

CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	PESO
Natural (vegetação nativa)	1,0
Urbano	1,5
Silvicultura	2,0
Pastagem	2,5
Agricultura (anual e perene)	3,0

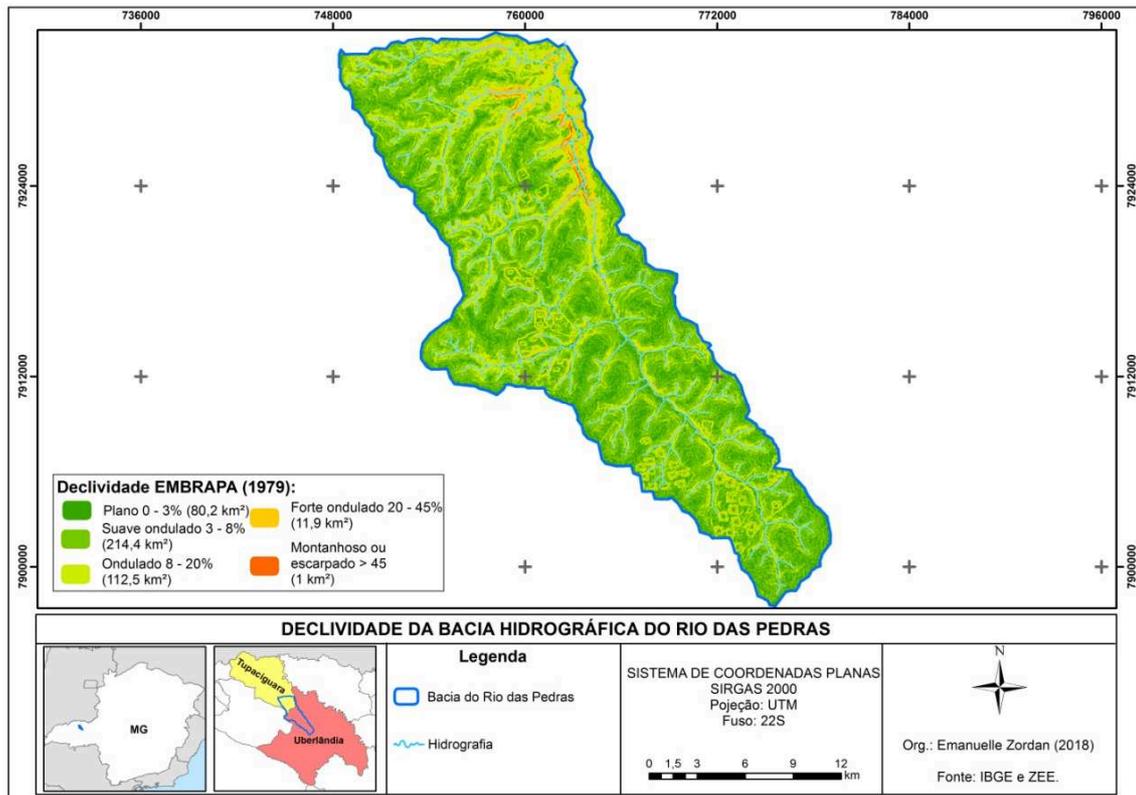
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho consistem nos mapas de Declividade, Tipologia de solos, Uso e ocupação do solo, referentes à Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras, que por meio da álgebra de mapas foram sobrepostos, gerando o mapa final de Vulnerabilidade do Solo da referida bacia.

3.1 Declividade

No que tange ao fator declividade, ocorre na área de estudo o predomínio da classe Suave Ondulado (3 - 8%), ocupando 214,4 km² e representando 51% da área total da bacia (Figura 2). Consecutivamente, tem-se a ocorrência da classe Ondulado (8 - 20%), ocupando 112,5 km² (26,8%); e a classe Plano (0 -3%) com 80,2 km² (19,1%). As classes mais declivosas, Forte ondulado e Montanhoso ou escarpado representam juntas 3,1% da área total da bacia e foram obtidas ao longo da calha do Rio das Pedras, acentuando-se em direção à foz.

Figura 2 - Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras



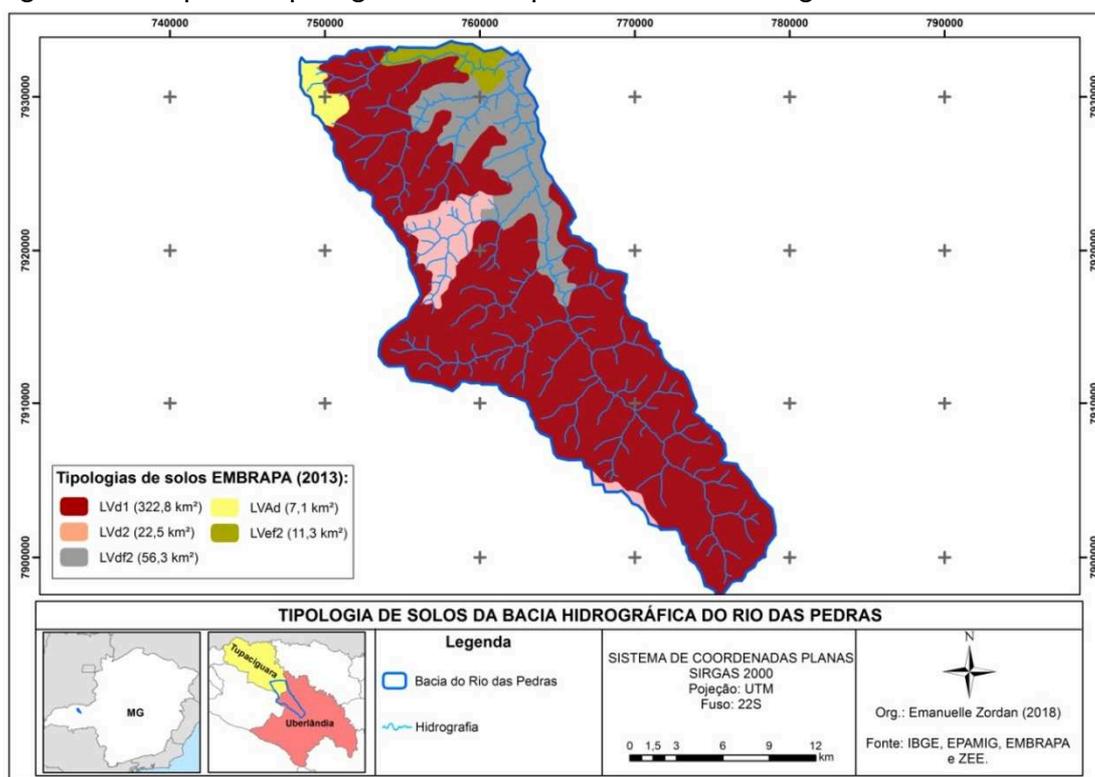
3.2 Tipologia dos solos

De acordo com o mapa de solos da EPAMIG (1980), com legenda adaptada para EMBRAPA (2013), foram identificadas cinco tipologias de solos na bacia do Rio das Pedras, pertencentes às classes de Latossolos, associados ainda a Argissolos, Cambissolos e Neossolos, na escala 1:500.000.

Segundo os autores Barbosa e Lorandi (2012), um fator que potencializa ou não a vulnerabilidade consiste na erodibilidade dos solos, que varia de acordo com as características físicas e químicas dos mesmos ou pela densidade da cobertura vegetal. A erodibilidade é definida como a capacidade de resistir aos processos erosivos (MANNIGEL et al., 2002; BARBOSA E LORANDI, 2012; CORRÊA et al., 2015).

Nota-se a partir da Figura 3, o predomínio de Latossolo Vermelho Distrófico (LVd1) ao longo da bacia, com área de 322,8 km², representando 76,9% do total, estando mais concentrado na parte alta da bacia, na região da nascente do Rio das Pedras. As demais tipologias totalizam 97,2 km² (23,1%), destacando-se a ocorrência da classe de solo mais frágeis (Latosolos associados a Neossolos) na parte baixa da bacia, mais especificamente em sua foz, favorecendo a susceptibilidade destas áreas à ocorrência de processos erosivos.

Figura 3 - Mapa de tipologia de solos para a Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras



3.3 Uso e ocupação do solo

A maioria das interferências antrópicas, quando realizadas de maneira incorreta no manejo do solo podem acarretar o desequilíbrio ambiental e afetar as águas subterrâneas e superficiais, a fauna e a vegetação, ocasionando danos e prejuízos tanto à população local quanto ao ecossistema da região (FARIA et al., 2003; BARBOSA E LORANDI, 2012).

Ao se analisar a Figura 4, nota-se, a partir dos dados obtidos por meio do satélite Landsat em conjunto com os dados fornecidos pelo projeto TerraClass, polígonos referentes a quatro classes de uso da terra e uma classe de vegetação nativa. O uso do solo predominante ao longo da bacia compreende a Pastagem, com área de 170,3 km² (40,5%), seguida pela Agricultura (23,7%) e por áreas Naturais com a presença de vegetação nativa margeando o leito dos rios em 22,6% do total. Os 13,2% restantes compreendem os usos de Silvicultura e Áreas Urbanizadas, que compreendem áreas relativamente estáveis.

Figura 4 - Mapa de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras

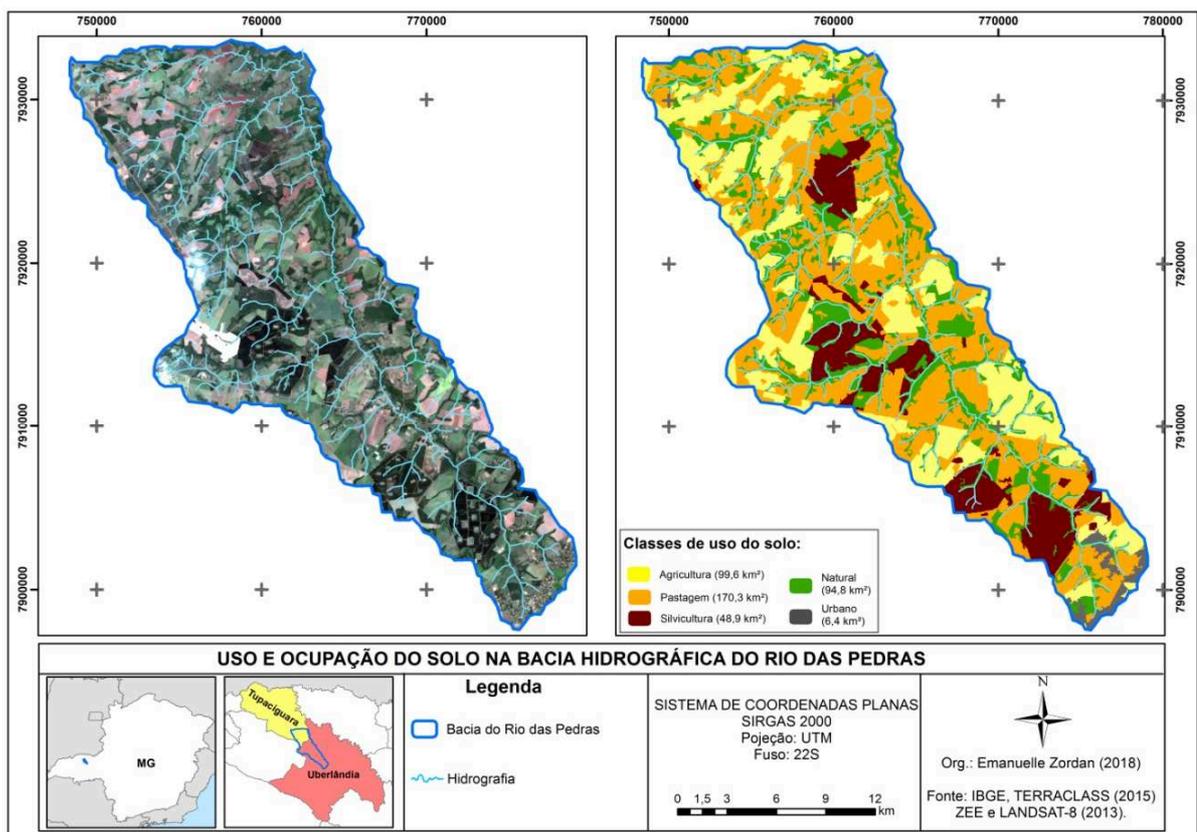


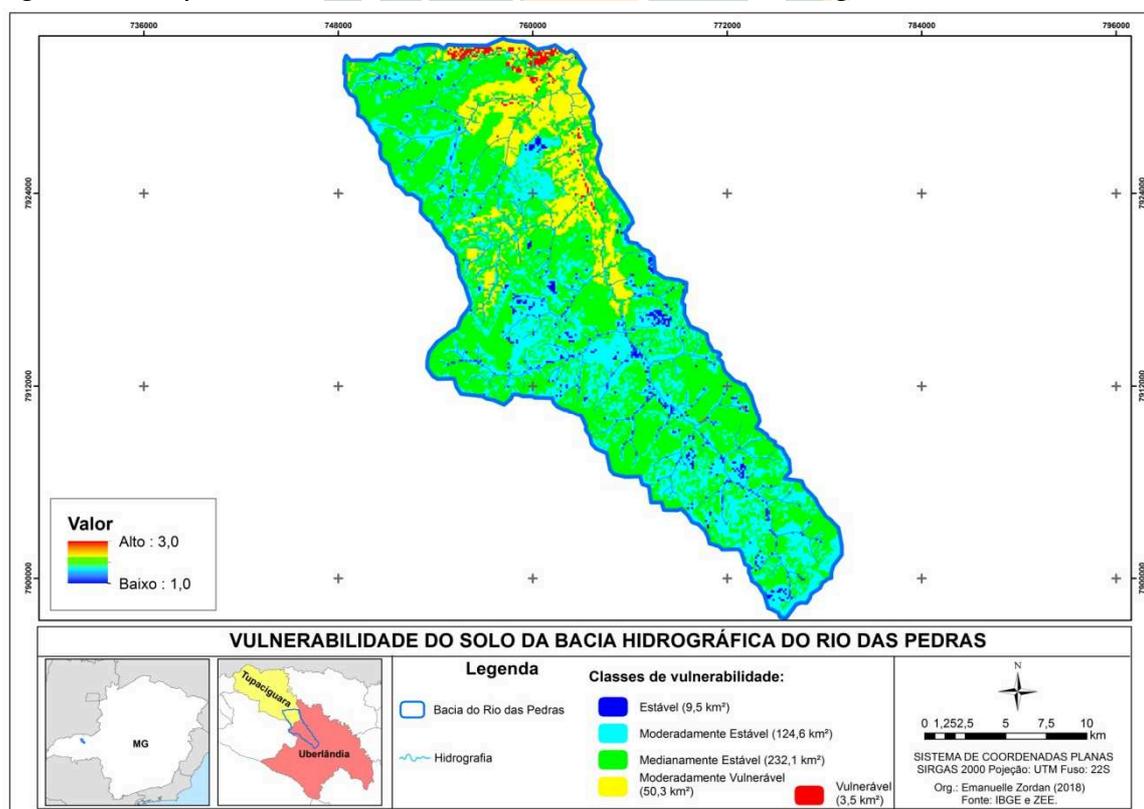
Tabela 8 - Classes e quantitativos levantados no uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras

CLASSE	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Agricultura (anual e perene)	99,64	23,73
Pastagem	170,24	40,54
Silvicultura	48,86	11,64
Urbano	6,40	1,52
Natural	94,78	22,57
Total	419,92	100,00

3.4 Mapa de Vulnerabilidade do Solo

A partir da metodologia proposta, da álgebra de mapas entre os três fatores analisados na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras (Declividade, Tipologia de solos e Uso e ocupação do solo), e dos pesos atribuídos a cada classe, foi obtido o Mapa de Vulnerabilidade do Solo apresentado na Figura 5:

Figura 5 - Mapa de Vulnerabilidade do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras



Conforme observado na Figura 5, foram obtidas cinco classes de vulnerabilidade do solo, variando de Estável a Vulnerável, com o predomínio da classe Medianamente Estável ao longo da bacia. Nota-se também, que a parte norte da bacia se mostrou mais vulnerável enquanto a região da nascente (porção sul) se mostrou mais estável. A vulnerabilidade ao norte é causada pela declividade expressiva e por estar nas proximidades da foz do Rio das Pedras. As áreas mais estáveis, classificadas como Estável (9,5 km²) e Moderadamente Estável (124,6 km²), representam o cruzamento entre as informações mais homogêneas de cada fator analisado (Declividade, Tipologia de solos e Uso e ocupação do solo), compreendendo aproximadamente 31,9% da área total da bacia. Essas classes foram observadas em locais que contemplam cobertura do solo com vegetação nativa e silvicultura, aliada a uma baixa declividade e ocorrência de solos mais estáveis.

Na região da foz do Rio das Pedras foi notória a presença de solos com declividades mais acentuadas (variando de ondulada a forte ondulada – Figura 2), mais jovens (Latosolos Vermelhos Eutróféricos + Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos – Figura 3), aliados ao desenvolvimento de atividades relacionadas com agricultura e pecuária (Figura 4). Essa combinação de fatores contribui para a ação erosiva do solo, o que explica a classificação Vulnerável nessa localidade.

Nos termos do Índice de Vulnerabilidade do Solo, pode-se notar que, em geral, a bacia em estudo pode ser considerada estável, visto que apenas 12,8% de sua área total compreendeu as classificações relacionadas com vulnerabilidade à erosão do solo, enquanto 87,2% da área apresentou indícios de estabilidade. A classe predominante ao longo da bacia compreendeu 232,1 km² (55,3%) como sendo Medianamente Estável, ocorrendo essencialmente nos locais em que foram observados Latossolos Vermelhos distróficos associados a declividades baixas e intermediárias, com usos do solo diversificados.

No trabalho de Costa et al. (2008), similar ao presente estudo, o referido autor apontou que os fatores topográficos, ambientais e de uso da terra se correlacionam e influenciam na vulnerabilidade das terras, e que a metodologia similar empregada identificou que sub-bacias hidrográficas devem ter especial atenção por serem mais vulneráveis aos processos erosivos.

Ao avaliar a estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena - Paraíba, Dias e Silva (2015), utilizando as geotecnologias, concluíram que os tipos de solos encontrados no município foram importantes para a análise da perda de solo devido à resistência (erodibilidade) que eles oferecem à ação dos processos erosivos. Foi pontuado também, a efetividade do estudo em identificar áreas com maior potencial de perda de solo.

Faria et al. (2003) aplicando técnicas de geoprocessamento no âmbito de bacia hidrográfica no Ribeirão do Espírito Santo, em Juiz De Fora (MG), para avaliar áreas com susceptibilidade à erosão, demonstraram que o uso de uma base geográfica e metodológica para análise ambiental por geoprocessamento, como proposto neste trabalho, pode auxiliar o poder público na tomada de decisão, por ser uma ferramenta robusta, rápida e barata.

Ainda no quesito de uso e ocupação do solo, Barbosa e Lorandi (2012) demonstram pelos resultados obtidos em sua pesquisa que os maiores valores de vulnerabilidade foram verificados nas áreas mais próximas às margens dos rios, visto que havia pouca vegetação ciliar nativa, fato também verificado nesta pesquisa, particularmente na região da foz do Rio das Pedras (Figura 4).

Rovani et al. (2015), mediante proposta similar à do presente trabalho, utilizaram-se de fatores como geomorfologia, geologia, solos, vegetação e uso e ocupação da terra para elaborar um mapa de vulnerabilidade natural à perda de solo do município de Barão de Cotegipe, RS, integrando os dados cartográficos em ambiente SIG. Corroborando aos resultados obtidos no presente estudo foram identificadas unidades estáveis e moderadamente vulneráveis, com o predomínio de unidades intermediárias identificadas no artigo consultado como mediamente estável/vulnerável.

Chen e Zha (2016), por sua vez, afirmam que a agricultura consiste em um dos principais fatores de degradação do solo, devido ao manejo inadequado que o expõe à erosão hídrica, afeta a sua estrutura e reduz sua matéria orgânica. Ainda segundo os autores, as pastagens também constituem um fator de vulnerabilidade, pois em manejos inadequados e em áreas inaptas são causa de compactação e perda da fertilidade do solo, resultando em processos erosivos, como ravinamentos, erosão laminar e até voçorocamentos.

Costa et al. (2008), afirmam que em bacias onde há predomínio de atividades agropecuárias podem ser adotadas soluções de baixo custo para o problema de erosão do solo, como por exemplo os sistemas de produção sustentáveis agroflorestais, plantio direto, sistema integração lavoura-pecuária para a recuperação de pastagens degradadas e sistemas silviculturais com controle de área.

4 CONCLUSÃO

A utilização de técnicas de geoprocessamento para a análise de vulnerabilidade a erosão do solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras foi fundamental, permitindo a identificação e localização de informações, por meio da manipulação de arquivos advindos de diversas fontes, contribuindo ainda como um banco de dados para a área estudada. A associação dos três fatores analisados no presente trabalho (declividade, tipologia de solos e uso e ocupação dos solos) representou satisfatoriamente a espacialização da vulnerabilidade a erosão ao longo da bacia, apresentando resultados coerentes e demonstrando a pertinência da simplificação desta análise para os três fatores elencados neste estudo.

Na Bacia Hidrográfica do Rio das Pedras foram identificadas cinco classes de vulnerabilidade variando de estáveis a vulneráveis. Apesar disso, a referida bacia pode ser considerada Estável, frente ao predomínio dessa classe ao longo da mesma. Ademais, o presente trabalho permitiu a identificação de áreas mais sensíveis ao longo da bacia (Vulneráveis e Moderadamente Vulneráveis), orientando a tomada de decisões e o direcionamento de ações prioritárias de recuperação e conservação por parte dos agentes envolvidos.

Nos termos do Índice de Vulnerabilidade do Solo, pode-se notar que, em geral, a bacia em estudo pode ser considerada Medianamente Estável, visto que 55,3% da área da bacia se enquadrou nessa classificação. Por outro lado, a classificação Moderadamente Vulnerável e Vulnerável totalizou, juntas, aproximadamente 12,8% da bacia, e foram percebidas predominantemente na parte baixa da mesma e na foz do Rio das Pedras.

Como estratégia de melhoramento e conservação da bacia, sugere-se que seja feita a substituição de culturas anuais por culturas perenes ou mesmo o

reflorestamento das áreas vulneráveis, utilizando espécies que criem corredores verdes e que possuam função ecológica importante para a biodiversidade da bacia.

VULNERABILITY INDEX IN THE RIO DAS PEDRAS WATERSHED, MINAS GERAIS, BRAZIL

ABSTRACT

The present study aimed at the validation of a Soil Vulnerability Index through "type", "use" and "slope" information of the soil in the Rio das Pedras Basin, in Uberlândia-MG, with the aid of techniques of Geoprocessing from the use of ArcGis software version 10.3. The results obtained were weighted according to the methodology proposed by Crepani (1996), resulting in a final map subdivided in to five distinct classes of vulnerability: Stable, Moderately Stable, Averagely Stable, Moderately Vulnerable and Vulnerable. The results showed the predominance of the Averagely Stable class along the basin (55.3%) and the occurrence of more vulnerable areas in the low basin region, from the association between younger soils, more intense slopes and agroforestry uses. It was concluded that the use of geoprocessing techniques proved to be fundamental to perform vulnerability analysis within watershed basins. In addition, a basin under study can be considered stable, and in areas where the most vulnerable classes predominate, it is necessary to prioritize recovery and conservation actions by the agents.

Keywords: River basin management. GIS. Soil.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Y. B.; LORANDI, R. **Geoprocessamento Aplicado ao Estudo da Vulnerabilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pântano nos Municípios de São Carlos, Analândia e Descalvado (SP)**. Revista Geografia (Londrina), v. 21, n. 1, p. 103-123, 2012.

CHANROBERT, B. C.; THOMPSON, A.; SADLER, J. **Validating the Soil Vulnerability Index for a claypan watershed**. - Journal Homepage: <www.elsevier.com/locate/catena> - ELSEVIER - (Catena 148 (2017) 185–194).CHEN, S.; ZHA, X. **Evaluationofsoilerosionvulnerability in**

theZhuxiwatershed, FujianProvince, China. Nat. Hazards, v.82, p.1589–1607, 2016.

CORRÊA, E. A.; MORAES, I. C.; PINTO, S. A. F. **Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas de solo na região do Centro Leste Paulista.** Geociências, v. 34, n. 4, p. 848-860, 2015.

COSTA, T. C. C.; FIDALGO, E. C.C.; UZEDA, M. C.; ZARONI, M. J.; NAIME, U. J.; GUIMARÃES, S. P. **Um indicador de vulnerabilidade para sub-bacias hidrográficas do estado do Rio de Janeiro.** Geografia, v. 17, n. 2, 2008.

CREPANI, E; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.;DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F.**Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico.**São José dos Campos: INPE, 1996.

DIAS, E. R.; SILVA, R. M. **Estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena - Paraíba.** Caminhos de Geografia, v. 16, n. 54, p. 192-204, 2015.

EL JAZOULI,A.; BARAKAT,A.; GHAFIRI, A.; EL MOUTAKI,S.; ETTAQY,A.; KHELLOUK, R. **Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco).** Geoscience, v.4, p.25, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: **REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10.,** 1979, Rio de Janeiro. Súmula... Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília-DF, 2013, 3a ed. 353 p.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS - EPAMIG. **Mapa de reconhecimento dos solos no Triângulo Mineiro.** Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. 1980. Disponível em:<<http://library.wur.nl/WebQuery/isric/21562>> Acesso em: 02 de junho de 2018.

FARIA, A. L. L.; SILVA, J. X.; GOES, M. H. B. **Análise ambiental por geoprocessamento em áreas com susceptibilidade à erosão do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, Juiz De Fora (MG).** Caminhos de Geografia. v.4, n.9, p.50-65, 2003.

LIMA, F. R.; MARTINELLI, M. **As unidades ecodinâmicas na Cartografia Ambiental de Síntese.**In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2008, Rio Claro. Anais eletrônicos... Rio Claro: UNESP, 2008. Disponível em:<<http://www.rc.unesp.br/igce/simpgeo/440-448fredy.pdf>>. Acesso em: 02 de junho. de 2018.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2010.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. **Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo.** Acta Scientiarum, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MARANDOLA JR., S. E.; HOGAN, D. J. **Vulnerabilidade: esboço para uma discussão conceitual.** In: SEMINÁRIO SOBRE QUESTÃO AMBIENTAL URBANA: EXPERIÊNCIAS E PERSPECTIVAS, 2004, Brasília. Textos.. Núcleo de Estudos Urbanos e Regionais da Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em:
<<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 28 Mar. 2019

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation.** Londres. Blackwell Publishing. 1995.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **As principais fitofisionomias do bioma Cerrado.** In SANO, S. M.; SEMÍRAMIS, P.; RIBEIRO, J. F. (Ed). Cerrado ecologiae flora. Brasília, Embrapa Cerrados. 2008. Cap. 6. p. 151-212.

ROVANI, F. F. M.; CASSOL, R.; WOLLMANN, C. A.; SIMIONI, J. P. D. **Análise da Vulnerabilidade Natural à perda de solo de Barão de Cotegipe, RS.** Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume 29 (2015), p. 262 a 278.

SÁ JUNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais.** 2009. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, V. C. L.; SILVA, L. P. **Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil.** Environmental Monitoring and Assessment. Wageningen: Springer, v. 185, n. p. 8977-8990, 2013.

SOUZA, V.; GALVANI, E. **Determinação do potencial natural à erosão laminar na Bacia do Rio Jacaré Guaçú (SP).** Revista Ra'e Ga, v. 39, n. p. 8-23, 2017.

TERRACLASS. **Mapeamento do uso e cobertura da terra do Cerrado.** Projeto TerraClass Cerrado 2013. Brasília-DF, 2015, 69 p