



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico

André dos Santos Ribeiro<sup>1</sup>, Ronaldo Luiz Mincato<sup>2</sup>, Nilton Curi<sup>3</sup>, Fernando Shinji Kawakubo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Ecologia e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas, R. Gabriel Monteiro da Silva, 700, CEP 37130-000, Centro, Alfenas, Minas Gerais. [andre.santosribeiro@yahoo.com.br](mailto:andre.santosribeiro@yahoo.com.br) <sup>2</sup>Professor Adjunto IV do Instituto de Ciências da Natureza e do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Alfenas, R. Gabriel Monteiro da Silva, 700, CEP 37130-000, Centro, Alfenas, Minas Gerais. (35) 3299 1419. [ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br](mailto:ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br) Autor correspondente. <sup>3</sup>Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Campus da UFLA, CEP 37200-000, Caixa Postal 3037, Lavras, Minas Gerais. [nilticuri@dcs.ufla.br](mailto:nilticuri@dcs.ufla.br). <sup>4</sup>Professor Adjunto II do Instituto de Ciências da Natureza da Universidade Federal de Alfenas, Av. Jovino Fernandes Sales, 2600, CEP 37130-000, Santa Clara, Alfenas, Minas Gerais. [fskgeo@gmail.com](mailto:fskgeo@gmail.com)

Artigo submetido em 18/08/2015 e aceite em 29/12/2015.

### RESUMO

A erosão hídrica é uma das maiores causas de depauperamento dos solos no mundo. No Brasil, a erosão causa a perda de produtividade, o avanço das fronteiras agrícolas, o assoreamento e a contaminação dos corpos d'água e a perda da biodiversidade. Neste cenário, para contribuir com o planejamento ambiental e a gestão territorial, foi avaliada a vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu, sul de Minas Gerais, pela análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Para tanto, foram considerados os componentes da paisagem: uso do solo, relevo, solo, geologia e clima, em ordem decrescente de importância, pelo Processo Analítico Hierárquico. Foi verificado que os usos do solo estão adequados em 32,72% e inadequados em 67,28% da área. Mais especificamente, 17,68% apresentam forte propensão à erosão hídrica e 0,08% são locais em que os impactos diretos da erosão hídrica são irreversíveis. Portanto, a adoção de técnicas de manejo adequadas para as pastagens, a erradicação dos solos expostos e a redefinição dos locais de produção de café e da agricultura temporária atenuariam os impactos ambientais.

**Palavras-Chave:** Erosão Hídrica; Fragilidade Ambiental; Uso do Solo; Bacia Hidrográfica do Rio Grande.

## Environmental vulnerability to water erosion in a hydrographic sub-basin by analytic hierarchy process

### ABSTRACT

Water erosion is one of the greatest causes of deterioration of soils worldwide. In Brazil, erosion causes loss of productivity, advance of the agricultural frontier, silting and contamination of water bodies and biodiversity loss. Therefore, to contribute to environmental planning and land management, the environmental vulnerability to water erosion of the Mandu river hydrographic sub-basin, southern Minas Gerais State, was evaluated by empirical analysis of the fragility of natural and anthropogenic environments. Landscape components taken into consideration were: land use, relief, soils, geology and climate, in descending order of priority by the Analytical Hierarchy Process (AHP). It was verified that the land uses are appropriate in 32.72% and inadequate in 67.28% in the area. More specifically, in 17.68% there is strong propensity to water erosion and in 0.08% of the site direct impacts of these processes are irreversible. So, the adoption of appropriate management techniques for pastures, the eradication of exposed soil and the rearrangement of coffee production sites and temporary agriculture would diminish the environmental impacts.

**Key-Words:** Water Erosion; Environmental Fragility; Land Use; Rio Grande Hydrographic Basin.

### Introdução

A erosão hídrica é uma das principais causas de degradação do solo no mundo, com perdas muito superiores às taxas naturais de reposição (Needelman, 2013). No Brasil, a

aceleração dos processos erosivos, com os usos do solo pelo homem, é responsável pelo carreamento de solos, sementes, adubos e agrotóxicos para lagos, rios e oceano (Andrade et al., 2010). As consequências são perda de produtividade, avanço

das fronteiras agrícolas, assoreamento e contaminação dos corpos d'água, além de perda da biodiversidade. De acordo com tais autores (op. cit.), neste cenário, o planejamento das atividades agropecuárias, contemplando as vulnerabilidades do ambiente e as potencialidades de uso, é imprescindível para minimizar sua degradação.

Para Nakashima (2001), as informações sobre a capacidade dos sistemas ambientais de resistirem a mudanças possibilitam o planejamento de uso com bases mais sustentáveis. Então, estudos relacionados à sensibilidade dos ambientes a mudanças, que abordem aspectos da vulnerabilidade ou estabilidade, são importantes para sustentabilidade e promoção da melhoria da qualidade ambiental. Neste cenário, o termo sensibilidade dos ambientes implica nas consequências para a qualidade de ambientes naturais perturbados pelos usos antrópicos.

Para Tricart (1977), o ambiente natural é um sistema aberto em que os componentes bióticos e abióticos possuem funcionalidades próprias, com inter-relações complexas, que estão em permanente equilíbrio dinâmico. O homem, por sua vez, pode comprometer este equilíbrio, de forma temporária ou permanente, com o uso inadequado de recursos naturais, como o solo. Assim, Tricart (1977) propôs a estratificação da paisagem em três tipos de unidades ecodinâmicas: 1) estáveis, com domínio da pedogênese sobre a morfogênese; 2) *intergrades*, com interferência permanente da morfogênese e da pedogênese no mesmo espaço e 3) instáveis, com domínio da morfogênese sobre a pedogênese.

A partir da concepção de unidades ecodinâmicas, Ross (1994; 2012) propôs a análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados, estratificando em cinco classes a vulnerabilidade da paisagem: muito fraca, fraca, média, forte, e muito forte. Neste método, os componentes da paisagem avaliados são: uso do solo, relevo, solo, geologia e clima. Para cada componente da paisagem é atribuído um grau de vulnerabilidade, que, depois, são combinados por meio de recursos analógicos ou de técnicas de análise espacial em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (Kawakubo et al., 2005) para gerar um produto cartográfico que sintetize a vulnerabilidade do ambiente natural integrada ao uso antrópico. Tal técnica pode ser utilizada para obtenção da vulnerabilidade do ambiente à erosão hídrica ou ao risco potencial de erosão, conforme exposto, respectivamente, em Xavier et al. (2010) e Fushita et al. (2011), desde que contemple os principais componentes da paisagem que interferem na intensidade dos processos erosivos.

De acordo com Ross (1994; 2012), as

etapas intermediárias consistem na elaboração de cartas que incluam características específicas dos componentes da paisagem avaliados. Em relação ao uso do solo, a vulnerabilidade está vinculada à capacidade dos diferentes tipos de cobertura de proteger ou potencializar as perdas de solo. Para o relevo, é considerada a inclinação ou os padrões de formas das vertentes. Quanto ao solo, é considerada sua erodibilidade intrínseca. Já, para o clima, é examinada a erosividade das chuvas, definida pela quantidade, intensidade e duração das precipitações. De maneira complementar, para Gonçalves et al. (2008), o risco de erosão ou de movimentos de massa associado à geologia de Minas Gerais está relacionado à porosidade, que interfere na quantidade do deflúvio acima da camada rochosa, à deformação tectônica e à presença de zonas de cisalhamento ou com intensidade das fraturas.

Com exceção da geologia, os demais componentes da paisagem fazem parte da Equação Universal de Perdas de Solos - EUPS (Wischmeier e Smith, 1978), em que o valor de perda de solo (A) é obtido pela multiplicação dos fatores: erosividade das chuvas (R), erodibilidade do solo (K), declividade e comprimento da vertente (LS), cobertura do solo (C) e práticas conservacionistas (P). Apesar da EUPS ser amplamente usada em estudos de quantificação dos processos erosivos (Weill e Sparovek, 2008), ela ainda é pouco utilizada no planejamento territorial. A exceção são os trabalhos sobre limite de tolerância de perda de solo, aplicados em pequenas sub-bacias (Ayer et al., 2015; Olivetti et al., 2015). Porém, de acordo com Ross (1994; 2012), os valores obtidos em estudos que quantificam as perdas de solo para cada característica específica de cada um dos fatores, podem ser utilizados para fundamentar a classificação da vulnerabilidade.

A partir dos dados de cada componente da paisagem, são gerados os planos de informação. Para sintetizar as características ambientais, Donha et al. (2006) recomendaram a utilização dos SIG, pois integram grande número de variáveis, geram informações intermediárias e finais rapidamente e permitem a inclusão de novas variáveis. Nesta etapa, Miara e Oka-Fiori (2007) indicaram o Processo Analítico Hierárquico (Analytical Hierarchical Process - AHP) de Saaty (1990), que possibilita ponderar e qualificar a importância relativa de cada variável. De acordo com Raffo (2012), a técnica é baseada na lógica da comparação aos pares em relação a uma meta ou critério. Tal processo permite organizar, avaliar a importância relativa de cada variável e medir a consistência dos julgamentos. Desta forma, é possível diminuir a subjetividade na hierarquização

dos principais fatores envolvidos num determinado processo.

As cartas obtidas nas etapas intermediárias possibilitam a elaboração do produto síntese sobre a vulnerabilidade ambiental, de acordo com a importância dos pesos ponderados. De tal modo, é possível sintetizar, em material cartográfico, a relação entre o ambiente físico e as atividades humanas (Fushita et al., 2011). Desta relação, podem ser identificados ambientes mais ou menos vulneráveis, o que contribui na definição de diretrizes e ações a serem implementadas, fornecendo subsídios à gestão territorial (Sporn e Ross, 2004).

A legislação ambiental brasileira incentiva que a administração dos recursos naturais e as pesquisas sobre uso e ocupação e organização espacial utilizem como recorte espacial a bacia hidrográfica (CONAMA, 1986).

No caso da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu, Gouvêa (2004) descreveu a degradação progressiva da qualidade ambiental pelo uso inadequado do solo, que promoveu a diminuição da disponibilidade e o aumento da degradação das

águas superficiais e assoreamento do canal principal do rio. Como consequências, cita impactos na fauna e flora aquáticas e adjacentes ao rio e na economia e na vida da população que habita o entorno do rio, pois houve impactos relacionados à pesca e à vida cultural da população que utilizava os recursos naturais do rio para complementação da renda, alimentação familiar e lazer.

Diante do exposto, a análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados de Ross (1994; 2012) foi aplicada para avaliar a vulnerabilidade do ambiente da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu à erosão hídrica, com vistas a contribuir com o planejamento ambiental e a gestão territorial.

### Material e métodos

A sub-bacia hidrográfica do rio Mandu pertence à sub-bacia do rio Sapucaí, que é afluente da bacia do rio Grande. Com 50.060,50 ha, abrange partes dos Municípios de Ouro Fino, Borda da Mata, Estiva e Pouso Alegre, no sul de Minas Gerais (Figura 1).

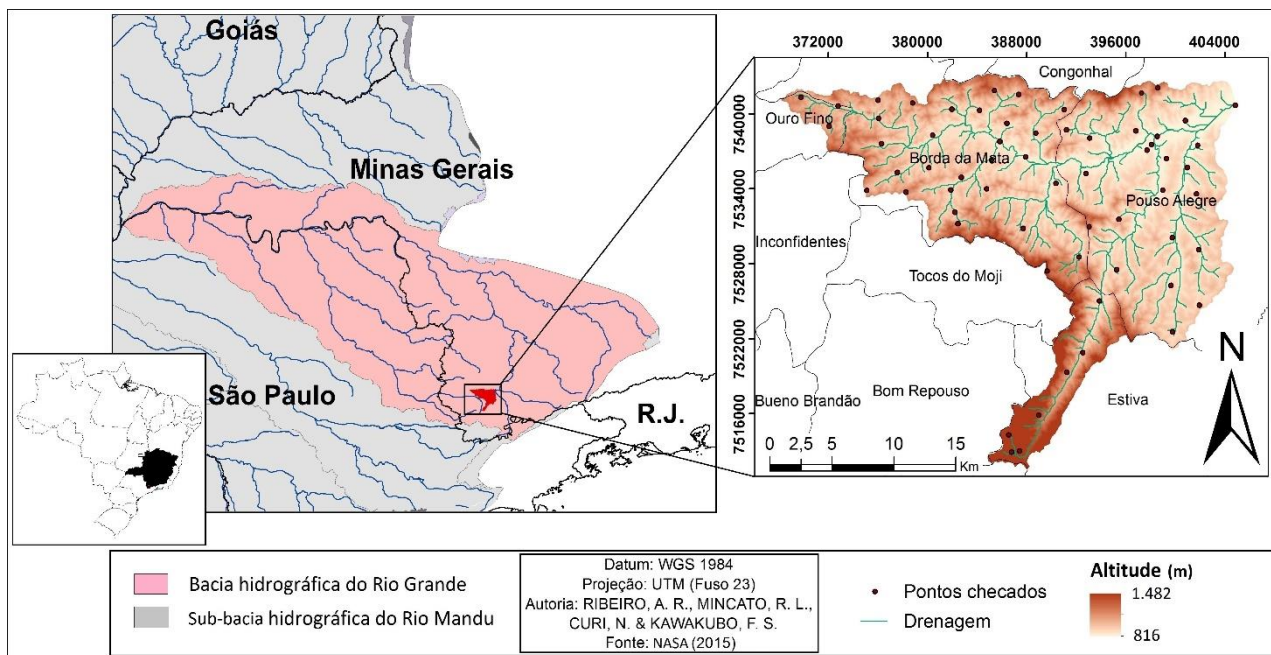


Figura 1. Localização da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu, sul de Minas Gerais.

O rio Mandu foi um recurso condicionante do povoamento local e tem importância econômica e cultural para os Municípios de Pouso Alegre e Borda da Mata (Gouvêa, 2004). Além disto, 100% da água fornecida à cidade de Borda da Mata e 71% da fornecida à cidade de Pouso Alegre, somando 98.627 habitantes atendidos (IBGE, 2014), são provenientes do rio Mandu (ANA, 2015).

O arcabouço geológico dominante na sub-bacia é formado por complexos granito-gnáissicos

e integra o Sistema Orogênico do Tocantins (CPRM, 1998). Tal estrutura sustenta o modelado geomorfológico do Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas Cristalinas ou Sedimentares (Machado e Silva, 2010), com variação altimétrica de 816 a 1.482 m. Associados a esta paisagem ocorrem solos com horizontes superficiais argilosos, na maioria profundos. Há predomínio dos tipos com horizonte B latossólico e B textural (FEAM, 2010).

O clima, na classificação de Köppen, é o tropical de altitude (Cwa e Cwb), com verões úmidos e brandos e invernos secos e frios (Sparovek et al., 2007), com pluviosidade média anual de 1.600 a 1.865 mm (Mello et al., 2007). O bioma dominante na região é a Mata Atlântica, com Floresta Estacional Semidecidual, substituída, em grande parte, por pastagens e pela agricultura (Scolforo et al., 2008).

Neste cenário, a classificação da vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica foi feita

de acordo com as proposições de Ross (1994; 2012), com base nos componentes da paisagem: uso do solo, relevo, solo, geologia e clima (Tabela 1), em ordem decrescente de importância, definida pelo Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchic Process* - AHP). A vulnerabilidade de cada componente foi alicerçada pelos valores dos fatores da EUPS: cobertura do solo (C), erodibilidade (K) e erosividade das chuvas (R).

Tabela 1. Componentes da paisagem, produtos cartográficos intermediários e os aspectos analisados para a determinação da vulnerabilidade à erosão hídrica da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Componentes da Paisagem	Produtos Cartográficos Intermediários	Aspectos Analisados
Uso do solo	Mapa de usos e cobertura do solo	Valor da proteção exercida por cada tipo de cobertura (C)
Relevo	Mapa de declividade Mapa de classes de relevo	- Índices de declividade - Classes de relevo
Solo	Mapa de solos	Valor da erodibilidade (K) intrínseca de cada classe de solo
Geologia	Mapa simplificado de unidades geológicas	- Porosidade - Deformação tectônica - Cisalhamento ou intensidade das fraturas
Clima	-	Valor da erosividade das chuvas (R)

Os usos do solo foram mapeados a partir de imagens obtidas pelo sensor *Operational Land Imager* (OLI) a bordo do satélite Landsat-8, nas bandas espectrais 4 R (0,630 – 0,680  $\mu\text{m}$ ), 3 G (0,525 – 0,600  $\mu\text{m}$ ), 2 B (0,450 – 0,515  $\mu\text{m}$ ) e 8 pancromática (0,500 – 0,680  $\mu\text{m}$ ) disponíveis em <<http://glovis.usgs.gov/>>. Foi aplicado o processo de fusão das imagens utilizando o algoritmo disponível no ArcGIS 10.1 para obter um produto híbrido que associasse informações espectrais dos canais do visível com maior detalhamento geométrico da banda pancromática.

O mapa de uso do solo foi produzido pela técnica de classificação por segmentos no aplicativo ENVI 4.5. Na primeira etapa, a composição colorida foi segmentada, ou seja, dividida em regiões similares de forma análoga ao processo de fotointerpretação. No ENVI 4.5 são definidos dois limiares na segmentação: o nível de escala, que divide a imagem em segmentos correlatos aos objetos do mundo real, e o nível de diluição, que dilui os segmentos menores nos maiores para evitar excessos de particionamentos. Após testes, os limiares definidos foram, respectivamente, 60 e 65. O desempenho foi aferido, visualmente, julgando o nível de detalhe e as generalizações. Na segunda etapa, foram extraídos os atributos espaciais, espectrais, texturais, de cor e razão de bandas que foram

utilizadas como base da classificação. Amostras contemplando diferentes tipos de uso da terra e de cobertura vegetal foram selecionadas. No total, foram definidas oito classes.

Por fim, os erros de omissão e comissão, gerados na classificação, foram corrigidos manualmente no ArcGIS 10.1, a partir de informações obtidas em campo.

Para a proteção que a cobertura e o uso do solo exercem foi adotado o critério de Ross (2012), para o qual há relação inversa entre a densidade de cobertura e as perdas de solo, e foi classificada conforme os valores do fator C da EUPS obtidos na literatura. Na sub-bacia, as pastagens foram consideradas degradadas com base no aspecto geral observado em campo, com feições de rastejos, sulcos e falhas no pasto, oriundos do sobrepastoreio e da ausência de técnicas de manejo, como o pastejo rotacional.

Para representar o relevo, foi feita a classificação da declividade no aplicativo ArcGIS 10.1, com dados de 30 m de resolução espacial obtidos do Modelo Digital de Elevação (MDE) *Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Map* (ASTER GDEM) da NASA (2015). As classes foram estabelecidas de acordo com os valores de EMBRAPA (2006). A partir das classes de declividade e do aspecto do relevo, observado em

campo e no MDE sombreado, foi elaborado o mapa de classes de relevo. Este mapa foi utilizado para adaptação do mapa de solos à escala de estudo e considera, concomitantemente, a variação

altimétrica, a inclinação das vertentes e as formas superficiais. Os valores, índices de declividade e classes de relevo utilizadas nesta etapa estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2: Classes, índices de declividade e tipos de relevo.

Classes de Relevo	Índices de Declividade	Tipos de Relevo
Plano (1)	≤ 3%	Plano
Suave Ondulado (2)	> 3 a ≤ 8%	Colinas e/ou Outeiros
Ondulado (3)	> 8 a ≤ 20%	Colinas e/ou Outeiros
Forte Ondulado (4)	> 20 a ≤ 45%	Outeiros e/ou Morros
Montanhoso (5)	> 45 a ≤ 75%	Morros e Montanhas
Escarpado (5)	> 75%	Escarpamentos

Fonte: EMBRAPA (2006).

Para obter um produto compatível com a escala adotada, o mapa pedológico original 1: 650.000 (FEAM, 2010) foi ampliado para 1: 200.000 por especialista em cartografia de solos a partir do critério de relações solo-paisagem descritas por Resende et al. (2002) e Menezes et al. (2013). Assim, a classificação das novas unidades

de solo foi feita de acordo com as classes do relevo de EMBRAPA (2006) e os horizontes B diagnóstico. Tais relações e as novas unidades de mapeamento, estratificadas a partir das unidades do mapa de solos original, estão discriminadas na Tabela 3.

Tabela 3. Combinações utilizadas para estratificar as unidades de mapeamento de solos da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Unidades de Mapeamento		Relevo	Solo
FEAM (2010)	Novas Unidades		
CXbd1	CXbd1	Ondulado	CX
	CXbd2	Forte ondulado	CX
LVAd15	LVAd1	Plano	LVA
	LVAd2	Suave ondulado	LVA
	LVAd5	Ondulado	LVA
LVAd21	LVAd4	Suave ondulado	LVA
	LVAd6	Ondulado	LVA
	CXbd3	Montanhoso	CX
LVAd25	LVAd3	Ondulado	LVA
	CXbd4	Forte ondulado	CX
LVAd6	CXbd2	Forte ondulado	CX
	LVd2	Plano	LV
	LVd1	Suave ondulado	LV
NXd1	LVd2	Ondulado	LV
	NXd1	Suave ondulado	NX
	NXd2	Ondulado	NX
PVAd11	CXbd2	Forte ondulado	CX
	PVAd5	Ondulado	PVA
	PVAd4	Forte ondulado	PVA
PVAd2	PVAd1	Plano	PVA
	PVAd2	Suave ondulado	PVA
	PVAd3	Ondulado	PVA
	CXbd2	Forte ondulado	CX
PVAd3	PVAd3	Ondulado	PVA
	CXbd2	Forte ondulado	CX
	CXbd3	Montanhoso	CX
PVd1	PVd1	Plano	PV
	PVd2	Suave Ondulado	PV
	PVd3	Ondulado	PV
RUbd1	SIV	Plano	SIV

Legenda: CXb: Cambissolo Háplico; LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo; LV: Latossolo Vermelho; NX: Nitossolo Háplico; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; RL: Neossolo Litólico; SIV: Solos Indiscriminados de Várzea; d: Distrófico.  
 Fonte: NASA (2015) e FEAM (2010).

Os solos indiscriminados de várzea (SIV), na planície próxima à foz do rio, tiveram a mesma espacialização dos Neossolos Flúvicos de FEAM (2010). Ainda em relação aos SIV, no restante da área, foi adotada a dimensão média das principais planícies obtidas em campo e em imagens do *Google Earth*. Desta forma, ficou estabelecido que os solos de várzea se estendem em média por 50 m em cada margem dos canais fluviais. A partir de então, foram delimitados por *buffer* de 50 m contíguo à cada margem da drenagem.

A vulnerabilidade intrínseca de cada tipo de solo foi definida conforme Ross (2012), para o

qual há relação inversa entre a profundidade, permeabilidade e coerência das partículas do solo e a erodibilidade. Esta proposta foi amparada pelos valores do fator K da EUPS obtidos na literatura.

Para a geologia, foi feito um mapa simplificado de unidades geológicas a partir do mapa geológico de CPRM (1998) digitalizado no aplicativo ArcGIS 10.1. Para a classificação da vulnerabilidade deste componente da paisagem, foi considerada a categorização de Gonçalves et al. (2008) sobre a presença ou ausência de risco à erosão ou movimentos de massa..

Tabela 4. Arcabouço tectônico e unidades geológicas da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu e parâmetros utilizados para classificação do risco à erosão e movimentos de massa.

Formação Geológica*	Unidades Geológicas*	Porosidade Primária**	Deformação Tectônica**	Cisalhamento ou fraturas**	Risco**	
Depósitos Recentes	Depósitos aluvionares	Alta (> 30%)	Não dobrada	Ausente	Sem registro	
	Coberturas cenozoicas	Alta (> 30%)	Não dobrada	Não fraturada	Sem registro	
Bacia Molássica	Metaconglomerados polimíticos	Variável (de 0 a 30%)	Não dobrada	Pouco a moderadamente fraturada	Sem registro	
	(Hornblenda) biotita granitos	Baixa (0 a 15%)	Intensamente dobrada	Zona de cisalhamento	Erosão e movimento de massa	
	Migmatitos de anatexia	Baixa (0 a 15%)	Intensamente dobrada	Intensamente fraturada	Erosão e movimento de massa	
	Gnaisses granulíticos charnoquíticos	Baixa (0 a 15%)	Intensamente dobrada	Intensamente fraturada	Erosão e movimento de massa	
	Domínios Socorro-Guaxupé e Faixa Alto Rio Grande	Hornblenda-biotita granito-granodiorito gnáissico	Baixa (0 a 15%)	Intensamente dobrada	Zona de cisalhamento	Erosão e movimento de massa
		Gnaisses migmatizados	Baixa (0 a 15%)	Intensamente dobrada	Zona de cisalhamento	Erosão e movimento de massa
Ortognaisses		Baixa (0 a 15%)	Intensamente dobrada	Zona de cisalhamento	Erosão e movimento de massa	
(Granada-hornblenda)-biotita gnaisses migmatizados		Baixa (0 a 15%)	Intensamente dobrada	Zona de cisalhamento	Erosão e movimento de massa	

Fonte: \*CPRM (1998) e \*\*Gonçalves et al. (2008).

Os autores utilizaram os parâmetros porosidade, intensidade de deformação tectônica e presença de zonas de cisalhamento ou de intensidade das fraturas (Tabela 4). Desta forma, quanto menor a porosidade, maior o deflúvio acima da camada rochosa, que favorece os escorregamentos e os processos erosivos. Já a

intensidade de deformação tectônica e a presença de zonas de cisalhamento ou de intensidade das fraturas interferem na concentração do fluxo de escoamento e favorecem os processos erosivos lineares

Tabela 5. Vulnerabilidade do componente clima conforme a erosividade das chuvas na sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Classes de erosividade (MJ.mm.ha <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	*Classes de Vulnerabilidade	**Erosividade
até 2.452	Muito Baixa (1)	-
de 2.452 a 4.086	Baixa (2)	-
de 4.086 a 4.905	Média (3)	-
de 4.905 a 9.810	Alta (4)	6.500 MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>
acima de 9.810	Muito Alta (5)	-

Fonte: \*Adaptado de Carvalho (2008) e \*\*Aquino et al. (2012).

Em síntese, a Tabela 6 apresenta as reclassificações da vulnerabilidade dos componentes da paisagem avaliados. Um diz

respeito ao uso antrópico, ao passo que os demais são componentes naturais da paisagem.

Tabela 6. Critérios e reclassificação da vulnerabilidade dos atributos de cada componente da paisagem.

Componentes	Classe de Vulnerabilidade					
	Muito Baixa (1)	Baixa (2)	Média (3)	Alta (4)	Muito Alta (5)	
<b>Antrópico</b>	<b>Uso do Solo</b>					
	Tipo de uso	Mata <sup>(1)</sup> ; Água <sup>(2)</sup> ; Área urbana <sup>(3)</sup>	-	Pastagem degradada <sup>(4)</sup> ; Café <sup>(5)</sup> ; Eucalipto <sup>(6)</sup>	Culturas Temporárias <sup>(7)</sup>	Solo Exposto <sup>(8)</sup>
	Valor do Fator C	0,0001 <sup>(1)</sup> e 0 <sup>(2) e (3)</sup>	-	0,10 <sup>(4)</sup> ; 0,1126 <sup>(5)</sup> e 0,30 <sup>(6)</sup>	0,5500 <sup>(7)</sup>	1 <sup>(8)</sup>
<b>Relev</b>	Índice de declividade	≤ 3%	> 3 a ≤ 8%	> 8 a ≤ 20%	> 20 a ≤ 45%	> 45%
<b>Naturais</b>	<b>Solo</b>					
	Tipo de solo	LVd <sup>(9)</sup> ; SIV <sup>(10)</sup>	LVAd <sup>(11)</sup> ;	PVd <sup>(12)</sup> ; NXd <sup>(13)</sup> ; PVAd <sup>(14)</sup> ;	CXbd <sup>(15)</sup> ;	-
	Valor do Fator K	0,0061 <sup>(9)</sup> e 0 <sup>(10)</sup>	0,0112 <sup>(11)</sup>	0,0228 <sup>(12)</sup> ; 0,023 <sup>(13)</sup> ; 0,027 <sup>(14)</sup>	0,0355 <sup>(15)</sup>	-
<b>Geologia</b>	Formação Geológica	Depósitos Recentes e Bacia Molássica	-	-	Domínios Socorro-Guaxupé e Faixa Alto Rio Grande	-
<b>Clima</b>	Erosividade das chuvas	-	-	-	Alta	-
	Valor do Fator R	-	-	-	6.500 <sup>(16)</sup>	-

Fonte: <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup> <sup>(7)</sup> Weill e Sparovek (2008); <sup>(4)</sup> Roose (1977); <sup>(5)</sup> Prochnow et al. (2005); <sup>(6)</sup> Martins et al. (2010); <sup>(8)</sup> Bertoni e Lombardi Neto (2008); <sup>(9)</sup> <sup>(11)</sup> <sup>(12)</sup> Mannigel et al. (2002); <sup>(10)</sup> recomendações de Silva et al. (2013); <sup>(13)</sup> Carvalho et al. (1989) apud Sá et al. (2004); <sup>(14)</sup> Resk et al. (1981) apud Sá et al. (2004); <sup>(15)</sup> Silva et al. (2009); <sup>(16)</sup> Aquino et al. (2012). O valor de C é adimensional, de K é em t.h.MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>) e de R em MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

Por fim, em relação ao clima, foi adotado o valor de erosividade estabelecido para a área por Aquino et al. (2012), que considerou a quantidade, intensidade e duração das precipitações. A classificação, quanto à vulnerabilidade, foi feita de acordo com a Tabela 5.

Após a classificação da vulnerabilidade dos componentes ambientais, foi feita a ponderação da importância relativa desses componentes (Tabela 7) utilizando uma matriz. A comparação foi feita par-a-par adotando valores que variam de 1 a 9, ou seja, “de igual importância” até “extremamente mais importante”. Após a construção desta matriz, os valores das colunas e das linhas foram normalizados. Nesta etapa, foi feito o somatório dos valores de cada coluna e, a seguir, o valor de cada célula foi dividido pelo resultado do somatório de sua respectiva coluna. A partir da média dos valores de cada linha normalizada foi atribuído o peso de cada componente em relação aos processos erosivos hídricos. A coerência dos julgamentos foi avaliada pelo índice de consistência que, de acordo com Saaty (1990) deve ser menor do que 0,1 ou 10%.

Além das observações em campo, a importância relativa de cada fator foi atribuída com

base na bibliografia. Para Weill e Sparovek (2008) e Freitas et al. (2012) a cobertura do solo é o componente mais importante no controle da erosão hídrica. Nessa perspectiva, ao uso do solo foi atribuído maior peso, pois a alteração da cobertura vegetal é que rompe o estado de equilíbrio dinâmico e acelera os processos erosivos. O relevo também desempenha papel marcante na aceleração destes processos, já que, de acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2008), a inclinação determina a velocidade do escoamento superficial. Na escala de trabalho adotada, os tipos de solos são menos relevantes, pois foram classificados de acordo com as relações solo-paisagem tal como recomendado por Nolasco-Carvalho et al., (2009) e, portanto, estão vinculados aos tipos relevo. A geologia é um componente menos relevante do que o tipo de solo (Fushita et al., 2011), por estar abaixo destes e não sofrer o impacto direto da precipitação e do deflúvio superficial, além de ser material menos intemperizado e mais coeso. O clima, por sua vez, é pouco influente, porquanto mesmo com elevada erosividade foram formados solos espessos, que denotam estabilidade natural entre a morfogênese e a pedogênese.

Tabela 7. Comparação pareada e ponderações dos principais componentes ambientais que interferem na vulnerabilidade à erosão hídrica da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu pelo AHP.

Parâmetros para comparação pareada								
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente	Muito forte-mente	Forte-mente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Forte-mente	Muito forte-mente	Extremamente
Menos importante				Mais importante				
Fatores	Comparação pareada					Pesos de Importância Calculados		
	Uso do solo	Relevo	Solo	Geologia	Clima			
Uso do solo	1	-	-	-	-	0,4567		
Relevo	1/3	1	-	-	-	0,2390		
Solo	1/3	1/3	1	-	-	0,1602		
Geologia	1/5	1/3	1/3	1	-	0,0844		
Clima	1/6	1/3	1/3	1/2	1	0,0597		
Índice de Consistência (IC) = 0,06								

Fonte: Adaptado de Donha et al. (2006).

A partir dos mapas intermediários, com seus atributos reclassificados com valores de 1 a 5, de acordo com o grau de vulnerabilidade, e com os pesos de importância ponderados para cada tema, foi feita a álgebra de mapas. Nesta etapa, a ferramenta usada foi a “*Weighted Sum*” do aplicativo ArcGIS 10.1. No mapa síntese resultante, as classes de vulnerabilidade foram estabelecidas de acordo com o valor de cada célula

(Tabela 8). Para tanto, as operações algébricas foram realizadas conforme a equação 1:

$$VA = U \times 0,4567 + R \times 0,2390 + S \times 0,1602 + G \times 0,0844 + C \times 0,0597 \quad (1)$$

em que: VA é a vulnerabilidade ambiental; U, R, S, G e C são, respectivamente, os componentes da paisagem uso do solo, relevo, solo, geologia e clima.



Tabela 8. Classificação da vulnerabilidade à erosão hídrica da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu de acordo com o valor de cada célula do mapa síntese.

Valor da Célula	Classificação da Vulnerabilidade
1 a $\leq$ 1,5	Muito Baixa
> 1,5 a $\leq$ 2,5	Baixa
> 2,5 a $\leq$ 3,5	Média
> 3,5 a $\leq$ 4,5	Alta
> 4,5 a 5	Muito Alta

Por fim os resultados da modelagem foram confrontados com os dados obtidos nas observações feitas em campo nos pontos de checagem ilustrados na Figura 1.

### Resultados e discussão

A sub-bacia hidrográfica do rio Mandu apresenta paisagem heterogênea em termos de usos do solo, relevo, solos e geologia. Somente a erosividade das chuvas não varia.

Os usos diversificados do solo propiciam diferentes graus de vulnerabilidade em função do manejo e da proteção exercida pela vegetação (Ross, 2012) e são determinantes na aceleração dos processos erosivos (Freitas et al., 2012). Na sub-

bacia hidrográfica, as culturas permanentes são os cafezais, que estão associados aos relevos mais íngremes, sobretudo no norte e centro de Borda da Mata. As culturas temporárias são: morango, alho, milho, mandioca, batata e hortaliças. O cultivo de morango está concentrado em Pouso Alegre e Estiva, enquanto o de alho em Borda da Mata e Ouro Fino. Os cultivos de milho, mandioca e batata estão adjacentes às planícies mais extensas em Borda da Mata e Pouso Alegre. Hortaliças são cultivadas em todos os municípios. Já os povoamentos de eucalipto estão dispersos e a maior concentração fica ao sul da área urbana de Pouso Alegre (Figura 2).

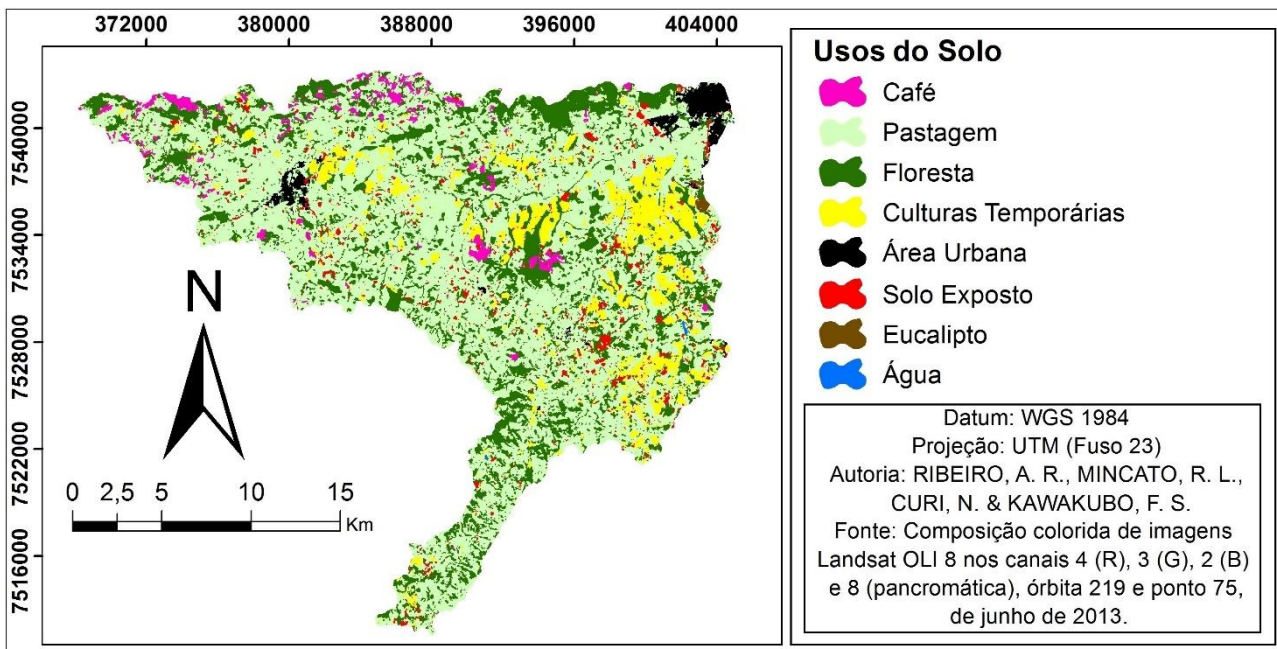


Figura 2. Mapa de usos e cobertura do solo da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

O relevo da sub-bacia é mais dissecado nas áreas com unidades geológicas mais intensamente deformadas. Todavia, tal característica não se restringe apenas aos divisores de águas. Algumas áreas mais dissecadas também são observadas em porções centrais da sub-bacia. Já as áreas menos

dissecadas estão relacionadas a unidades geológicas mais recentes, do cenozoico. A declividade média das vertentes é de 17,97% e a classe predominante é a de declividade média, com 8 a 20% de declividade (Figura 3).

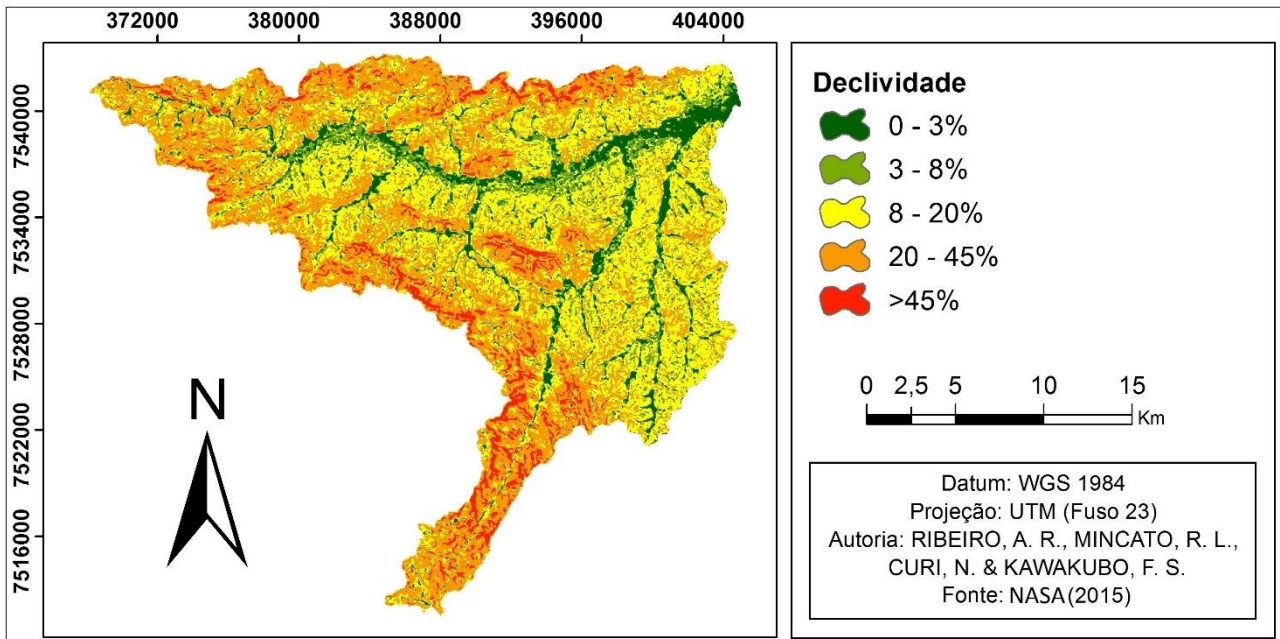


Figura 3. Mapa de índices de declividade da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Na classificação do relevo, de acordo com EMBRAPA (2006), observa-se a predominância da

classe de relevos ondulados (Figura 4).

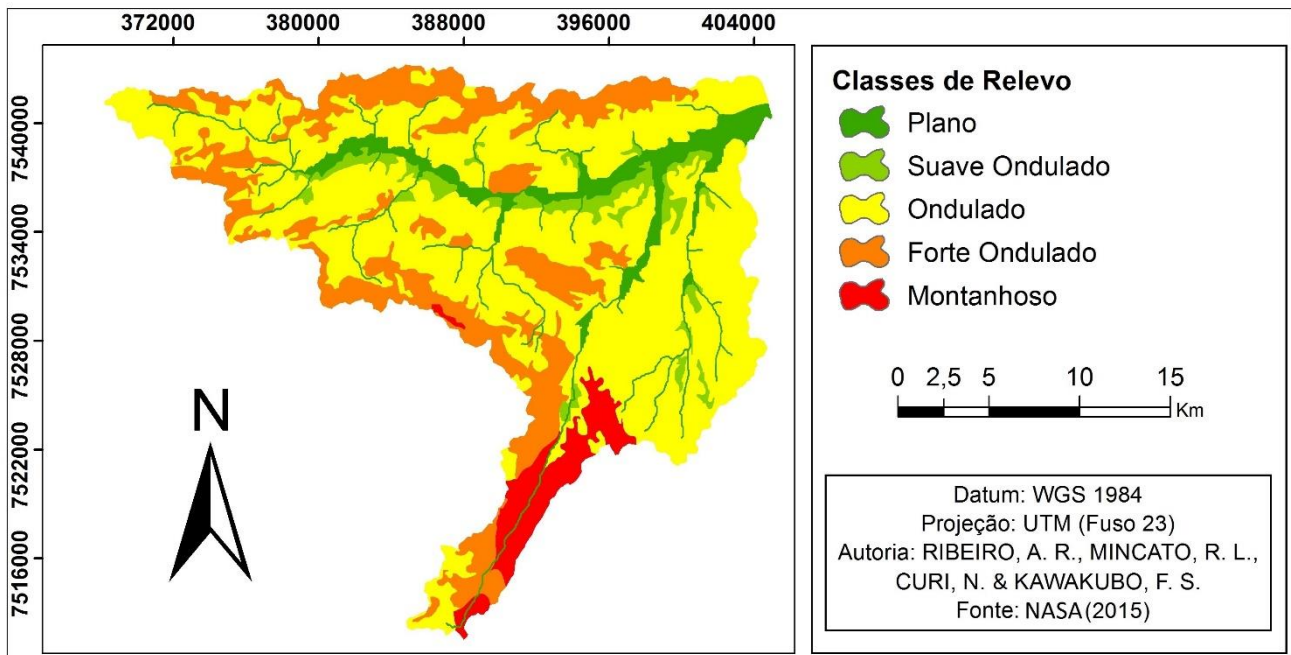


Figura 4. Mapa de classes de relevo da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Em relação aos solos, as classes do mapa pedológico de FEAM (2010), ampliado conforme descrito na Tabela 3, foram adaptadas às classes de relevo, ilustradas na Figura 4. A distribuição espacial dessas novas classes está ilustrada na Figura 5.

O contexto regional para formação destas unidades de solo remete ao intenso intemperismo do material rochoso pela ação das águas. Disto resultaram solos com horizonte superficial argiloso, distróficos e majoritariamente profundos.

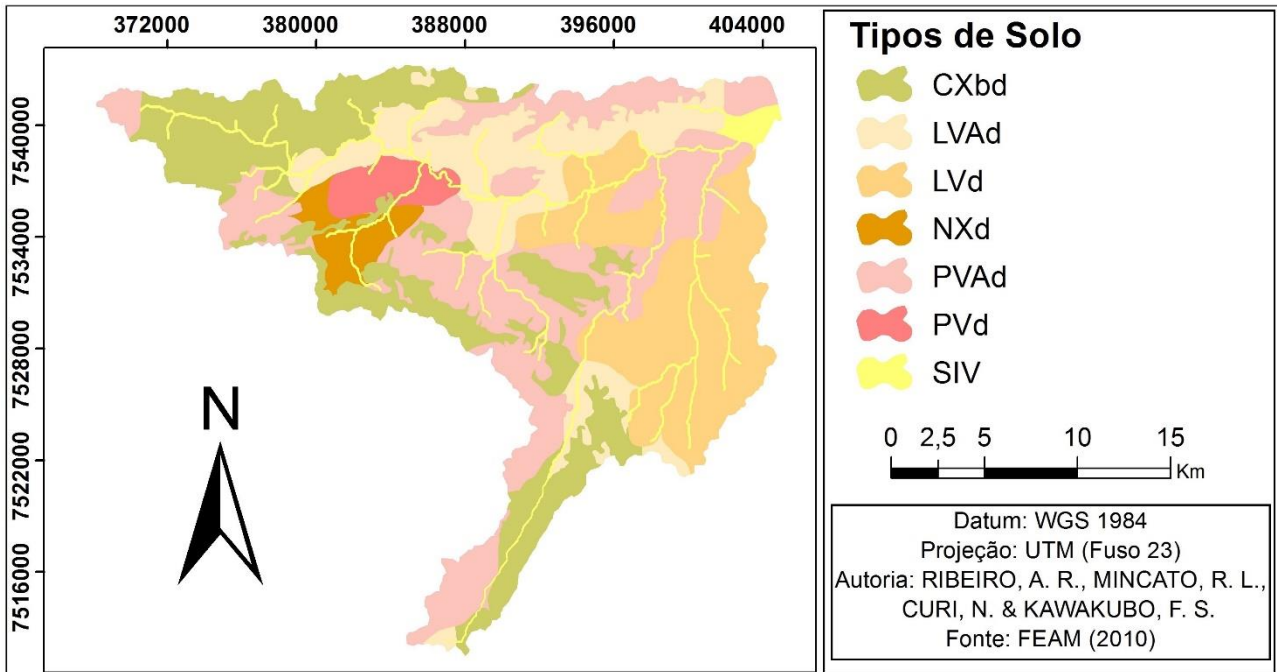


Figura 5. Mapa simplificado de solos da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu. Siglas: CXb: Cambissolo Háplico; LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo; LV: Latossolo Vermelho; NX: Nitossolo Háplico; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; SIV: Solos Indiscriminados de Várzea; d: Distrófico.

Os solos mapeados foram Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Cambissolos e Solos de Várzea. Em termos gerais, Latossolo é o grupamento de solos com B latossólico, de perfil evoluído e estágio avançado de meteorização (EMBRAPA, 2006). Para Resende et al. (2002), os Latossolos argilosos são os de menor erodibilidade, bastante permeáveis e razoavelmente coerentes. Outros solos com perfis evoluídos são os Argissolos e os Nitossolos, com B textural, que são caracterizados pelo incremento do teor de argila do horizonte A para o B (EMBRAPA, 2006). A diferença textural entre os horizontes dificulta a infiltração de água abaixo do horizonte A e favorece a erosão (Resende et al., 2002). Já os Cambissolos são rasos de perfil pouco evoluído, com horizonte B incipiente (EMBRAPA, 2006). Tais solos apresentam problemas de permeabilidade e são vulneráveis à erosão hídrica, enquanto os solos de várzea ocorrem em áreas com declive praticamente nulo, com excesso de água e não sujeitos à erosão (Silva et al., 2013).

A história geológica do sul de Minas Gerais é altamente complexa. A evolução foi

policíclica e polifásica e remonta ao Arqueano com eventos metamórficos, magmáticos, anatéticos, migmatíticos e deformacionais superpostos. Estes terrenos compreendem várias unidades litoestruturais infra e supracrustais. Em síntese, o arcabouço geológico da região faz parte do sistema orogênico do Tocantins, com predomínio dos complexos granito-gnáissicos (Hasui, 2010). Dentro deste contexto, as unidades geológicas da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu estão ilustradas na Figura 6. Na borda norte, as maiores altitudes estão localizadas nos terrenos graníticos, ortognássicos e gnáissicos migmatíticos. De forma similar, as bordas a sul e a sudoeste são sustentadas por granitos, granito-gnaisses, gnaisses migmatizados, gnaisses charnoquíticos e migmatitos. Na porção central, os gnaisses charnoquíticos também sustentam um relevo mais dissecado. A leste as coberturas cenozoicas indiferenciadas formam um conjunto de colinas amplas que se estendem até as áreas de deposição dos rios (CPRM, 1998).

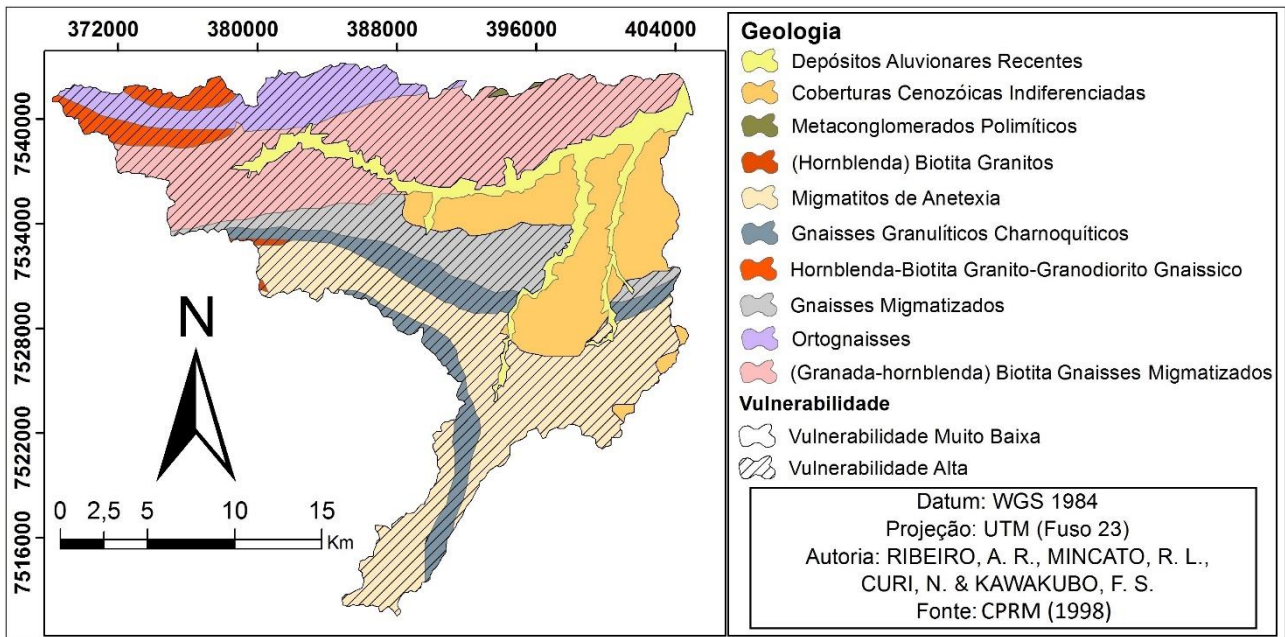


Figura 6. Mapa simplificado da vulnerabilidade das unidades geológicas da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Por fim, a vulnerabilidade do componente clima foi considerada alta e, de acordo com Silva et al. (2009), os maiores riscos relacionados à erosão hídrica ocorrem entre novembro e março, com maior potencial erosivo das chuvas e maior

umidade antecedente do solo.

Em síntese, as áreas percentuais dos componentes da paisagem correspondentes a cada classe de vulnerabilidade estão detalhadas na Tabela 9.

Tabela 9. Percentual de área de cada componente da paisagem correspondente a classe de vulnerabilidade na sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Área de Vulnerabilidade Ambiental por Componente da Paisagem (%)					
Classes de Vulnerabilidade	Uso do Solo	Declividade	Solo	Clima	Geologia
Muito Baixa	24,16	9,17	25,83	-	23,48
Baixa	-	12,82	15,10	-	-
Média	63,51	35,06	32,07	-	-
Alta	9,34	35,61	25	100	76,52
Muito Alta	2,99	7,34	-	-	-

A partir dos produtos intermediários sobre uso do solo, relevo, solo, geologia e clima, as operações algébricas foram feitas e a vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica foi

obtida e está ilustrada na Figura 7, com as áreas percentuais correspondentes a cada classe detalhadas na Tabela 10.

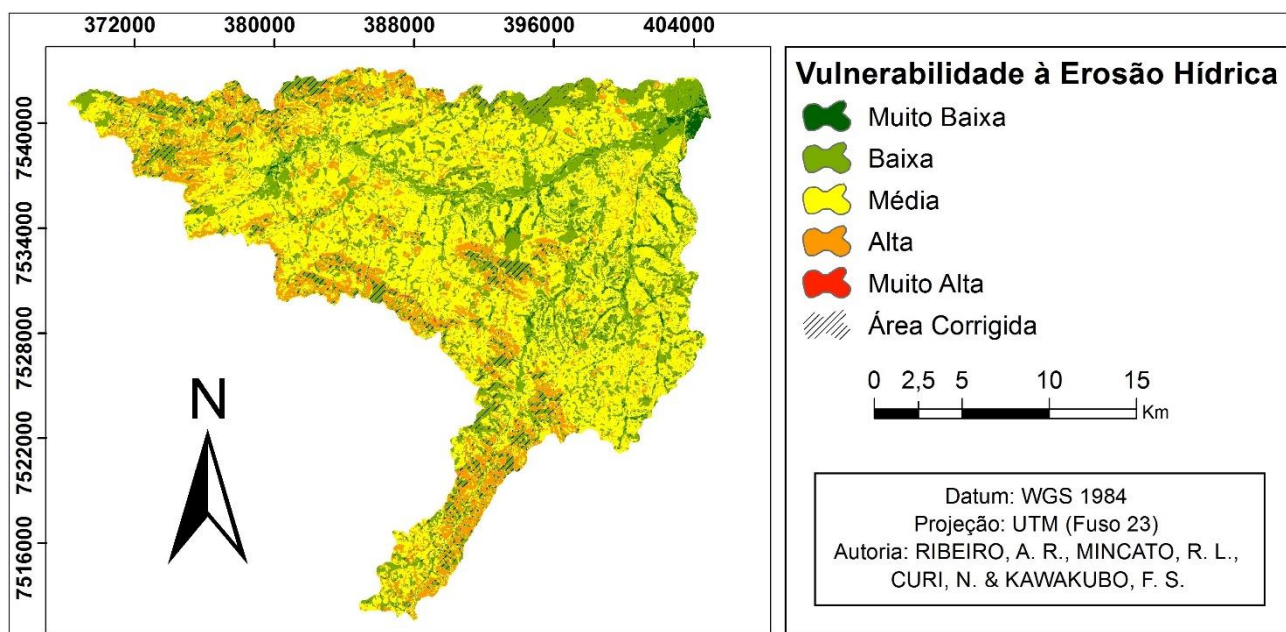


Figura 7. Mapa da vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica da sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Tabela 10. Percentual de área, com e sem correções, correspondente a cada classe de vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do rio Mandu.

Classes de Vulnerabilidade	Área de Vulnerabilidade Ambiental por Classe (%)	
	Vulnerabilidade Ambiental sem áreas corrigidas	Vulnerabilidade Ambiental com áreas corrigidas
Muito Baixa	2,03	2,03
Baixa	23,20	30,69
Média	57,09	49,60
Alta	17,60	17,60
Muito Alta	0,08	0,08

Quando confrontadas, as observações feitas em campo com os resultados da modelagem proposta, foi constatado eficiência de 92,51% na classificação da sub-bacia quanto à erosão hídrica, que não foi representativa em 7,49% da área, pois possuem elevado potencial natural a processos erosivos e, estas características, como elevadas declividades, com solos com horizonte B textural ou incipiente e embasamento geológico que propicia risco à erosão, influenciaram demasiadamente os valores de vulnerabilidade. Nestas áreas, em campo, não foram encontradas feições erosivas quando cobertas por matas. Portanto, foi necessário reclassificar a classe de vulnerabilidade mediana para a de baixa vulnerabilidade (Figura 8).

As áreas com vulnerabilidade muito baixa e baixa são estáveis em relação à erosão hídrica, mas correspondem a pouco menos de um terço do total da sub-bacia (32,72%) e estão localizadas nas áreas urbanizadas, devido à impermeabilização, e nas áreas florestadas, devido à proteção exercida pela vegetação. Também foram mapeados usos compatíveis com o ambiente, nos quais há pouca

ou nenhuma declividade, solos com baixa erodibilidade e unidades geológicas que não oferecem riscos à erosão.



Figura 8. Fotografia na localização 7540,325 km N e 372,803 km E. Destaque para a influência dos usos do solo na formação de feições que indicam aceleração da erosão, como sulcos, ravinas e rastejos. Exemplo de área utilizada com pastagem e classificada como de vulnerabilidade forte e de área com floresta e classificada como de vulnerabilidade média, que foi reclassificada como de vulnerabilidade baixa. Isto ocorreu, devido à vegetação nativa proteger o solo da erosão hídrica.

Somadas as classes de vulnerabilidade média, forte e muito forte, 67,28% da sub-bacia possui grau relevante de instabilidade à erosão hídrica (Figura 9). Nelas predomina a morfogênese em relação à pedogênese. Assim, os usos do solo aceleraram os processos erosivos e promoveram impactos ambientais negativos diretos e indiretos.

A classe de vulnerabilidade média ocupa quase a metade da área da sub-bacia e é a de maior extensão. Neste caso, a classificação foi influenciada sobretudo pelos valores associados às pastagens degradadas e aos cafezais em declividades medianas sobre solos com horizonte B textural. Igualmente, a classe mediana prevaleceu na maioria dos locais utilizados para agricultura temporária, pois a maior parte dela está em relevo ondulado e sobre Latossolos ou Argissolos. Nestes casos, a vulnerabilidade foi atenuada pelas características naturais.

As áreas com grau mais elevado de instabilidade, classificadas como de vulnerabilidade forte e muito forte, somam 17,68%. De maneira geral, possuem declividade alta ou muito alta associada a solos rasos ou que apresentam dificuldade de infiltração da água entre seus horizontes e estão assentados sobre embasamento geológico em que há risco de erosão hídrica. Apesar de representar uma parcela pequena da área total, os locais com vulnerabilidade muito forte causam os impactos mais graves ao ambiente e devem ser prioritários em termos de medidas mitigadoras.

A partir deste cenário e com vistas a contribuir com o planejamento ambiental e a gestão territorial, podem ser feitas algumas considerações quanto à adequação dos usos do solo. As pastagens precisam ser manejadas adequadamente, com pastejo rotacional, calagem dos solos e redução do sobrepastoreio. Os cafezais e a agricultura temporária são recomendados para os ambientes com características naturais mais estáveis. Já os solos expostos necessitam de manejos com cobertura adequada como forma de evitar a perda excessiva de solo.

Vale ressaltar que o AHP foi a técnica utilizada para relativizar a importância de cada

componente da paisagem em relação à erosão hídrica. Tal técnica aliou o conhecimento consolidado sobre tais processos ao da área de estudo, sem negar a influência de cada um dos componentes.

Os resultados obtidos com este tipo de modelagem, de acordo com Pinese Junior e Rodrigues (2012), servem para assinalar as áreas que merecem maior atenção quanto a estudos mais específicos e medidas mitigadoras a serem adotadas.

### Conclusões

1. Os usos do solo aceleraram os processos erosivos e, devido a isto, há predomínio da morfogênese em detrimento da pedogênese.

2. Em 67,28% da sub-bacia há grau relevante de vulnerabilidade à erosão hídrica. Destes, 17,68% são preocupantes (e carecem de medidas mitigadoras para não serem agravados) e em 0,08% os impactos ambientais negativos diretos são irreversíveis.

3. A adoção de técnicas de manejo adequadas para as pastagens, a erradicação dos solos expostos e o rearranjo dos locais de produção de café e da agricultura temporária atenuariam muito os impactos ambientais negativos diretos e indiretos.

4. A modelagem feita com auxílio do AHP foi eficiente na classificação de 92,51% da área, mas as observações feitas em campo foram fundamentais para a obtenção de resultados mais fidedignos à área.

### Agradecimentos

À UNIFAL-MG pela bolsa de mestrado PIB-Pós.

Ao Departamento de Ciência do Solo da UFLA pelo apoio.

Ao Dr. Walbert Júnior Reis dos Santos, Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, *campus* Muzambinho, pela colaboração no mapeamento dos solos.

### Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas, 2015. Brasil: Atlas do abastecimento urbano. Disponível: <<http://atlas.ana.gov.br/atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=8>>. Acesso: 20 jan. 2015.
- Andrade, A.G., Freitas, P.L., Landers, J., 2010. Aspectos Gerais Sobre o Manejo e Conservação do Solo e da Água e as Mudanças Ambientais, in: Prado, R.B., Turetta, A.P.D., Andrade, A.G. (Org.), Manejo e Conservação do Solo e da Água no

- Contexto das Mudanças Ambientais. EMBRAPA Solos, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Rio de Janeiro, pp. 25-40.
- Aquino, R., Silva, M.L.N., Freitas, D.A.F., Curi, N., Mello, C.R., Avanzi, J.C., 2012. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia* 36, 533-542.
- Ayer, J.E.B., Olivetti, D., Mincato, R.L., Silva, M.L.N., 2015. Erosão Hídrica em Latossolos Vermelhos Distróficos. *Pesquisa e Agropecuária Tropical* 45, 180-191.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F., 2008. *Conservação do Solo*, 6 ed. Ícone, São Paulo.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1986. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986 publicada no Diário Oficial da União, de 17 de fevereiro de 1986. Disponível: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=23>>. Acesso: 24 mar. 2012
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1998. *Carta Geológica Guaratinguetá*. São Paulo: Superintendência Regional CPRM. 1 mapa. Escala 1: 250.000.
- Donha, A.G., Souza, L.C.P., Sugamoto, M.L., 2006. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 10, 175-181.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 1 ed. CNPS - Centro Nacional de Pesquisas de Solos, Rio de Janeiro.
- Freitas, D.A.F., Silva, M.L.N., Castro, N.E.A., Cardoso, D.P., Dias, A.C., Carvalho, G.J., 2012. Modelagem da proteção do solo por plantas de cobertura no sul de Minas Gerais. *Agroambiente* 6, 117-123.
- Fushita, A.T., Camargo-Bortolin, L.H.G., Arantes, E.M., Moreira, M.A.A., Cançado, C.J., Lorandi, R., 2011. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica médio Mogi Guaçu superior (SP). *Revista Brasileira de Cartografia* 63, 609-618.
- Gonçalves, J.H., Sampaio, A.R., Jesus, J.D.A., Leão, R., 2008. GEOBANK. Disponível: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso: 15 jan. 2015.
- Gouvêa, O.M., 2004. *A História de Pouso Alegre*, 2 ed. Gráfica Amaral, Pouso Alegre.
- Hasui, Y., 2010. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. *Geociências* 29, 141-169.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2014. *Cidades: Pouso Alegre*. Disponível: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=315250&search=minas-gerais|pouso-alegre>>. Acesso: 20 jan. 2015.
- Kawakubo, F.S., Morato, R.G., Campos, K.C., Luchiari, A., Ross, J.L.S., 2005. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2203-2210.
- Machado, M.F., Silva, S.F., 2010. Geodiversidade: Adequabilidade/Potencialidades e Limitações Frente ao Uso e à Ocupação, in: Machado, M.F., Silva, S.F. (org.), *Geodiversidade do Estado de Minas Gerais*. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral e Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, pp. 49-94.
- Mannigel, A.R., Carvalho, M.P., Moreti, D., Medeiros, L.R., 2002. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do estado de São Paulo. *Acta Scientiarum* 24, 1335-1340.
- Martins, S.G., Silva, M.L.N., Avanzi, J.C., Curi, N., Fonseca, S., 2010. Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e em mata atlântica nos tabuleiros costeiros do estado do Espírito Santo. *Scientia Forestalis* 38, 517-526.
- Mello, C.R., Sá, M.A.C., Curi, N., Mello, J.M., Viola, M.R., Silva, A.M., 2007. Erosividade mensal e anual no Estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42, 537-545.
- Menezes, M. D., Silva, S. H. G., Owens, P. R., Curi, N., 2013. Digital soil mapping approach based on fuzzy logic and field expert knowledge, *Ciência e Agrotecnologia* 37, 287 – 298.
- Miara, M.A., Oka-Fiori, C., 2007. Análise por múltiplos critérios para a definição de níveis de fragilidade ambiental – Um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-Cará, Ponta Grossa/PR. *Revista Ra'eGa* 13, 85-98.
- Nakashima, M.S.R., 2001. Carta de fragilidade ambiental da bacia do rio Keller, Estado do Paraná: subsídio ao estudo dos processos erosivos. *Acta Scientiarum* 23, 1547-1560.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration, 2015. *ASTER GDEM: Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Map*. Disponível: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>>. Acesso: 15 jan. 2015.

- Needelman, B.A., 2013. What are Soils?. Nature [online] 4. Disponível: <<http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/what-are-soils-67647639>>.
- Nolasco-Carvalho, C.C., Franca-Rocha, W., Ucha, J.M., 2009. Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 46-55.
- Olivetti, D., Mincato, R. L., Ayer, J. E. B., Silva, M. L. N., Curi, N. Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic red latosol (oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the south of Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia* 39, 58 – 67.
- Paes, F.S., Dupas, F.A., Silva, F.G.B., Pereira, J.C.D., 2010. Espacialização da perda de solo nas bacias hidrográficas que compõem o município de Santa Rita do Sapucaí (MG). *Geociências* 29, 589-601.
- Pinese Junior, J.F., Rodrigues, S.C., 2012. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade (MG). *Revista do Departamento de Geografia – USP* 23, 4-26.
- Prochnow, D., Dechen, S.C.F., Maria, I.C., Castro, O.M., Vieira, S.R., 2005. Razão de perdas de terra e fator C da cultura do cafeeiro em cinco espaçamentos, em Pindorama (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29, 91-98.
- Raffo, J.G.G., 2012. O Processo Analítico Hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. *Revista do Departamento de Geografia – USP volume especial de 30 anos*, 26-37.
- Resende, M., Curi, N., Resende, S.B., Côrrea, G.F., 2002. *Pedologia: base para distinção de ambientes*, 4 ed. NEPUT, Viçosa.
- Roose, E.J., 1997. Application of the universal soil loss equation of Wischmeier and Smith in West Africa in: Greenland, D.J., Lal, R. (org.), *Soil conservation and management in the humid tropics*, Wiley, Ann Arbor, pp.177-187.
- Ross, J.L.S., 1994. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *Revista do Departamento de Geografia - USP* 8, 63-74.
- Ross, J.L.S., 2012. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. *Revista do Departamento de Geografia - USP volume especial de 30 anos*, 38-51.
- Sá, M.A.C., Lima, J.M., Curi, N., Massaroto, J.A., Marques, J.J.G.S.M., 2004. Estimativa da erodibilidade pela desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39, 691-699.
- Saaty, T.L., 1990. How to make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 48, 9-26.
- Scolforo, J.R.S, Mello, J.M., Silva, C.P.C., 2008. Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila – Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição diamétrica e de altura, Volumetria e Tendências de crescimento e Áreas aptas para manejo florestal, 1 ed. UFLA, Lavras.
- Silva, M.A., Freitas, D.A.F., Silva, M.L.N., Oliveira, A.H., Lima, G.C., Curi, N., 2013. Sistemas de Informações Geográficas no Planejamento de Uso do Solo. *Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 8, 316-323.
- Silva, M.S., Silva, M.L.N., Curi, N., Avanzi, J.C., Ferreira, M.M., 2009. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 1811-1820.
- Sparovek, G., Van Lier, Q.J., Dourado Neto, D., 2007. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. *International Journal of Climatology* 27, 257-266.
- Spörl, C., Ross, J. L. S., 2004. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *GEOUSP - Espaço e Tempo* 15, 39-49.
- Tricart, J., 1977. *Ecodinâmica*, 1 ed. FIBGE/SUPREN, Rio de Janeiro.
- FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Disponível: <[http://www.dps.ufv.br/?area=mapa\\_solos](http://www.dps.ufv.br/?area=mapa_solos)> Acesso: 03 out. 2012.
- Weill, M.A.M., Sparovek, G., 2008. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I – Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 801-814.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. 1 ed. Supersedes *Agriculture Handbook: United States Department of Agriculture*, Washington.
- Xavier, F.V., Cunha, K.L., Silveira, A., Salomão, F.X.T., 2010. Análise da suscetibilidade à erosão laminar na bacia do rio Manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando Sistemas de Informações Geográficas. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 11, 51-60.