

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO CAMAQUÃ (RS)

Henrique Noguez da Cunha

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
Porto Alegre, RS, Brasil
henriquencunha@gmail.com

José Maria Filippini Alba

Embrapa Clima Temperado,
Pelotas, RS, Brasil
jose.filippini@embrapa.br

Adalberto Koiti Miura

Embrapa Clima Temperado,
Pelotas, RS, Brasil
adalberto.miura@embrapa.br

Dejanira Luderitz Saldanha

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, RS, Brasil
dejanira.saldanha@ufrgs.br

RESUMO

A suscetibilidade à erosão do solo na bacia hidrográfica do Alto Camaquã foi mapeada considerando fatores físicos e de uso e coberturas da terra, por meio de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG). Os fatores físicos incluíram feições geológicas, geomorfológicas e pedológicas. Portanto, foi realizada uma análise multicritério para decisão, em SIG, por álgebra de mapas. Foram discriminadas duas regiões: A suscetibilidade física à erosão do solo foi baixa na região oeste, mas a suscetibilidade dos componentes de uso e cobertura da terra foi média à alta; A suscetibilidade foi alta na região leste, com pouco uso da terra devido à alta declividade do relevo e ocorrência de montanhas com afloramentos rochosos, o que significa más condições agrícolas.

Palavras-chave: Rio Camaquã; Sistema de Informações Geográficas (SIG); Sensoriamento Remoto.

ANALYSIS OF SUSCEPTIBILITY TO EROSION IN THE "ALTO CAMAQUÃ" WATERSHED (RS)

ABSTRACT

The susceptibility to soil erosion in the Alto Camaquã watershed was mapped considering physical factors and land use, by means of remote sensing and geographic information systems (GIS). Physical factors included geological, geomorphological and pedological features. Thus, a GIS based multicriteria decision analysis was performed by maps algebra. Two regions was discriminated: Physical susceptibility to soil erosion was low in the western region, but the land use component of susceptibility was mean to high; Physical susceptibility was high in the east region with few land use due to high slope relief and occurrence of mountains with rock outcrops, that means bad agricultural conditions.

Key words: Camaquã River; Geographic Information System (GIS); Remote Sensing.

INTRODUÇÃO

A crescente industrialização, a mecanização da agricultura e os avanços tecnológicos e econômicos da exploração dos recursos naturais vêm alterando o equilíbrio dinâmico da natureza (THOMAZIELLO, 2007). Assim, são introduzidas práticas que desequilibram as condições naturais do sistema, de maneira que, os processos erosivos são acelerados (WEILL; PIRES NETO, 2007).

Os problemas ambientais são causados principalmente pelo uso inadequado da terra, por frequentes alterações não planejadas, acima da capacidade de suporte dos elementos do meio físico como a ocupação e uso das áreas de preservação permanente e a remoção da cobertura vegetal das matas ciliares.

Em áreas rurais, o manejo impróprio do solo, sem a adequada observação dos riscos de degradação ambiental, tem desencadeado processos erosivos acelerados, um dos principais fatores determinantes da deterioração da qualidade ambiental (GUERRA e CUNHA, 1996; PRUSKI et al., 2006).

Para zoneamento e avaliação da susceptibilidade à erosão frente os recursos naturais e antrópicos, a bacia hidrográfica (BH) tem sido utilizada como uma unidade sistêmica de planejamento (CHRISTOFOLETTI, 1995; PISSARRA, 1998; PISSARRA et al., 2004). A espacialização das informações em grandes áreas requer a utilização de sistemas nos quais seja possível integrar os dados.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) subsidiam o pesquisador na visão geral e temporal da área de estudo, aplicado em estudos que envolvem o planejamento ambiental, a capacidade de uso da terra, modelagens quantitativas de impactos ambientais e realização de diferentes formas de zoneamento (CÂMARA e ORTIZ, 1998).

Os produtos gerados por Sensores Remotos têm colaborado fortemente na análise e integração de dados em análises voltadas para grandes porções territoriais. Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas aos processamentos digitais de imagens contribuem para a avaliação e o monitoramento dos elementos físicos e antrópicos (COSTA et al, 2000).

A elaboração e aplicação de modelos em estudos de erosão vêm sendo um recurso amplamente utilizado para a delimitação e espacialização de áreas com maior e menor susceptibilidade à erosão, favorecendo o zoneamento ambiental e, conseqüentemente, o planejamento ambiental de bacias hidrográficas.

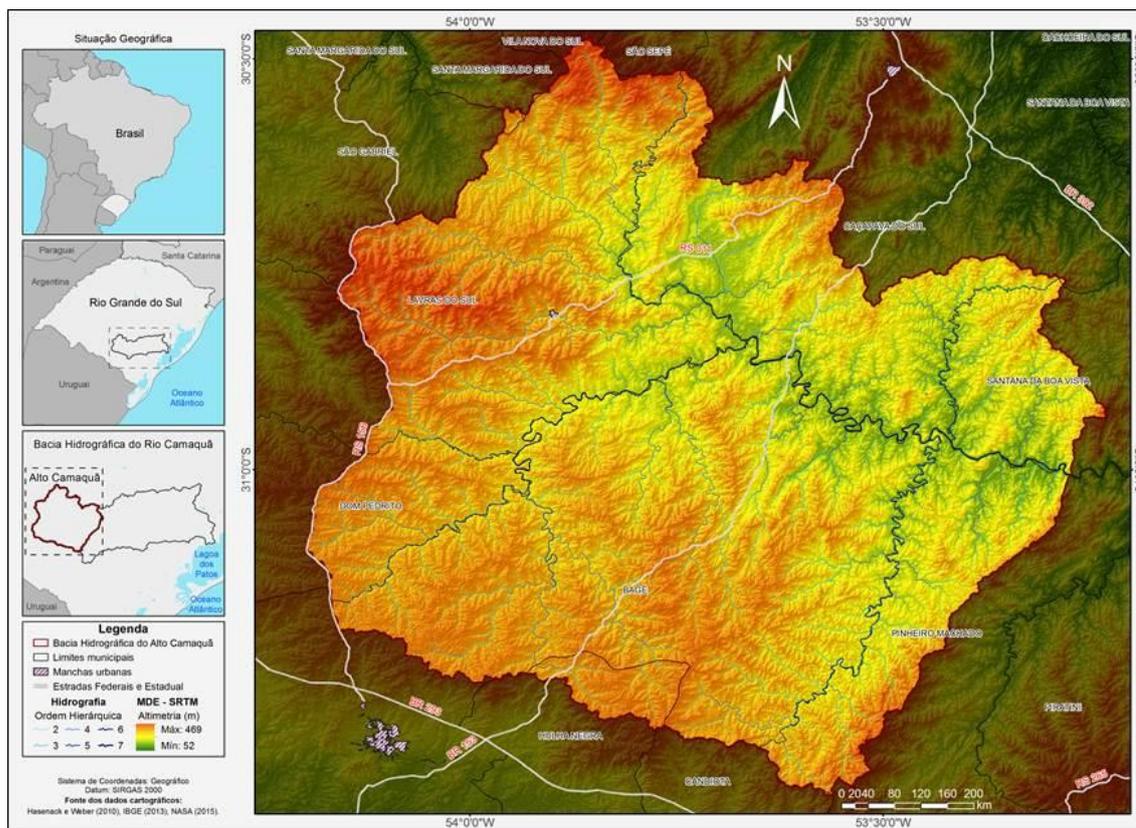
Dentre os modelos mais utilizados, destacam-se a análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados proposta por Ross (1994) e a análise da vulnerabilidade natural à perda de solo desenvolvida e indicada por Crepani et al (1996).

O fato de inexistirem estudos dessa natureza na Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã e a importância da análise de suscetibilidades e potencialidades dos ambientes que compõem a área de estudo são os motivos da proposta deste trabalho. Por meio da avaliação de suscetibilidade à erosão do solo, mapa síntese dos mapeamentos de elementos físicos (fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos) e antrópicos, serão apresentados os níveis de suscetibilidade à erosão dos diversos ambientes, os quais poderão subsidiar o planejamento territorial.

METODOLOGIA

O Alto Camaquã se refere a área de drenagem imposta pelos divisores de águas mais à montante na Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã. A BH do Alto Camaquã abrange os municípios de Bagé, Caçapava do Sul, Dom Pedrito, Lavras do Sul, Pinheiro Machado e Santana da Boa Vista somando um total de 5126 km² (Figura 1). Situa na região fisiográfica da Serra do Sudeste, Rio Grande do Sul, sobre domínio do bioma Pampa com vegetação heterogênea. É considerada como zona de transição ecológica com presença de campos naturais e florestas (HASENACK; CORDEIRO, 2006; IBGE, 2004). As florestas são classificadas como estacionais semidecíduais predominantemente presentes nas encostas e ripícola aos rios (TEIXEIRA et al., 1986).

Figura 1: Mapa da área de estudos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este trabalho foram utilizados os planos de informações (PIs) geológica do CPRM (WILDNER et al., 2008), altimétricas SRTM disponibilizado por NASA (2015) com resolução espacial de 30 metros, de unidades geomorfológicas disponibilizado pelo IBGE (2012a) em escala 1:250.000 e pedológica do IBGE (2012b), além da base cartográfica do Rio Grande do Sul em escala 1:50.000 (HASENACK e WEBER, 2010).

Todo procedimento metodológico foi realizado em ambiente SIG ArcMap 10.2.2 (ESRI, 2014) e de processamento digital de imagens ENVI 5.2 (*Exelis Visual Information Solutions*, Boulder, Colorado).

Tendo como base as metodologias de Crepani et al (2001), foi realizada a integração dos dados temáticos, analisando os temas dos pontos de vista físico e antrópico. O trabalho consistiu inicialmente na análise individual de cada uma das informações contidas nos mapas temáticos. Assim, foram analisados e classificados, de acordo com os padrões metodológicos de Crepani et al. (2001) (Tabela 1), os temas: geologia, geomorfologia, pedologia e uso e cobertura da terra do ano de 2015 para a Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã.

Os dados geológicos foram classificados de acordo com Crepani et al (2001), assim, as unidades geológicas com predomínio de rochas que representam maior grau de coesão foram classificadas como estáveis (10), as unidades que apresentam rochas com valores intermediários como medianamente suscetível/estável (20) e suscetível (30) aquelas que apresentam rochas com baixo grau de coesão.

De acordo com Crepani et al (2001), as informações geomorfológicas são obtidas por meio da média dos parâmetros morfométricos de amplitude hipsométrica, clinografia e suscetibilidade à erosão das unidades geomorfológicas.

Para o mapeamento da amplitude altimétrica foi utilizado o modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) do método proposto por Rennó et al. (2008), o qual obtém do Modelo Digital de Elevação (MDE) a distância vertical de cada *pixel* em relação à drenagem mais próxima. Este procedimento foi

realizado por meio da extensão Hand_grid (Rennó et al., 2008) do software ENVI 5.2 (*Exelis Visual Information Solutions*, Boulder, Colorado).

Tabela 1: Relação das classes com o grau de suscetibilidade à erosão.

Classe de suscetibilidade	Grau de suscetibilidade à erosão	Classe de suscetibilidade	Grau de suscetibilidade à erosão
10	Estável	23	Moderadamente suscetível
11			
12			
13			
14	Moderadamente estável	27	Suscetível
15			
16			
17			
18	Medianamente suscetível/estável	28	
19			
20			
21			
22			

Fonte: Crepani et al., 2001 (Modificada pelo autor).

Inicialmente foi realizada a correção do MDE SRTM (NASA, 2015), que conta com o ajuste de possíveis inconsistências nos dados altimétrico originais mosaicados, por meio do preenchimento de pixels com valores altimétricos discrepantes. Essas anomalias são comumente representadas por pixels sobre dosséis de árvores (RENNÓ et al., 2008). Em seguida foram gerados os planos matriciais de direção de fluxo, fluxo, Altura em relação a drenagem mais próxima, pela substituição do valor dos pixels da rede de drenagem para o valor zero e também a alteração do valor de cada célula para a amplitude em relação à drenagem mais próxima.

As informações de amplitude altimétrica foram reclassificadas em intervalos de suscetibilidade à erosão de acordo com metodologia proposta por Crepani et al (2001).

Em ambiente SIG ArcMap 10.2.2 (ESRI, 2014), a partir do mosaico dos dados SRTM foi gerado o mapa clinográfico por meio da relação entre a distância vertical e a distância horizontal entre cada dois pixels ($\text{tangente} = \frac{\text{cateto oposto}}{\text{cateto adjacente}}$). As informações de declividade resultantes foram reclassificadas em cinco intervalos de suscetibilidade à erosão, segundo Crepani et al (2001).

Para cada campo do plano de informações de unidades geomorfológicas foi atribuído um valor de suscetibilidade de acordo com Crepani et al. (2001).

Para o mapeamento da suscetibilidade à erosão da Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã os arquivos de Suscetibilidade à erosão de Declividade, Amplitude Altimétrica e Unidades Geomorfológicas foram convertidos em arquivos matriciais. Em seguida, foi elaborada a média simples destes três planos de informações matriciais seguindo a metodologia de Crepani et al (2001).

As unidades presentes no plano de informações (PI) pedológico foram classificadas, em ambiente SIG ArcMap 10.2.2 (ESRI, 2014), de acordo com os níveis de Suscetibilidade à erosão propostos por Crepani et al. (2001).

Para realizar o mapeamento da Suscetibilidade do meio físico da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã os planos de informações vetoriais de Suscetibilidade à erosão de Pedologia e Geologia foram convertidos em planos matriciais.

Os dados de imagem *Raster* de suscetibilidade à erosão para Pedologia, Geologia e Geomorfologia foram submetidos a média simples, retornando o grau de resistência ao processo natural à erosão desde classes com estabilidade até áreas de suscetibilidade natural à erosão.

Os dados utilizados para o mapeamento da Suscetibilidade do uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã foram extraídos de quatro conjuntos de imagens Landsat 8OLI (tabela 2). Concomitantemente foram utilizados como subsídio e orientação os PIs de rede viária digitalizado de cartas topográficas do exército, escala 1:50.000, por Hasenack e Weber (2010) e hidrografia extraída do MDE SRTM (NASA, 2015).

Tabela 2: Informações de órbita, ponto e data das imagens landsat 8 utilizadas.

Imagens Landsat	
Órbita/ponto	Data
223/081	27 de março de 2015
223/082	12 de abril de 2015
222/081	13 de abril de 2015
222/082	13 de abril de 2015

Elaboração: O autor.

As imagens foram transformadas em valores de reflectância (CHANDER et al., 2009) e submetidas a uma correção atmosférica, com base na subtração do *pixel* escuro (Chavez, 1988), para minimizar os efeitos de espalhamento, absorção e refração da energia eletromagnética, principalmente para as bandas do visível. Isto permitiu compatibilizar os dados multitemporais, uniformizando-os na mesma escala radiométrica (SONG, et al. 2001; LU et al, 2004).

O produto pré-processado foi submetido à classificação supervisionada, optando-se pelo método da máxima verossimilhança (STRAHLER, 1980), na qual amostras de treinamento dos principais alvos, baseados em classes de uso e cobertura da terra propostas por IBGE (2006), (silvicultura, cobertura florestal, campestre, solo exposto, Lavouras temporárias e corpos de água) foram utilizadas como critérios de decisão e formação das classes para a classificação (MIURA et al., 2009). Posteriormente, as classes foram vetorizadas e exportadas para ambiente SIG onde foram relacionadas espacialmente com os planos de informações de rede hidrográfica, sistema viário e imagem Landsat 8OLI. Isso tornou possível a edição do plano vetorial de solo exposto para a geração dos atributos de área urbana e afloramentos rochosos por meio de interpretação visual assistida em tela, assim como a validação do resultado da classificação com a reambulação realizada em campo.

Por fim, o resultado da suscetibilidade para o Uso e Cobertura da terra foi convertido em uma grade matricial, variando entre valores de estabilidade e suscetibilidade. Para a confiabilidade do tema de uso e cobertura da terra, a classificação foi submetida ao teste *Kappa* a partir de pontos planimétricos com informações de uso da terra registradas em trabalho de campo. Este teste avalia a confiabilidade a partir da proporção de concordância entre duas ou mais variáveis, classificado entre o valor 1 (máximo), representando absoluta concordância, até valores negativos, indicando nenhuma concordância (COHEN, 1960).

Cada classe de uso e cobertura da terra foi reclassificada pelo grau de suscetibilidade à erosão de acordo com Crepani et al (2001).

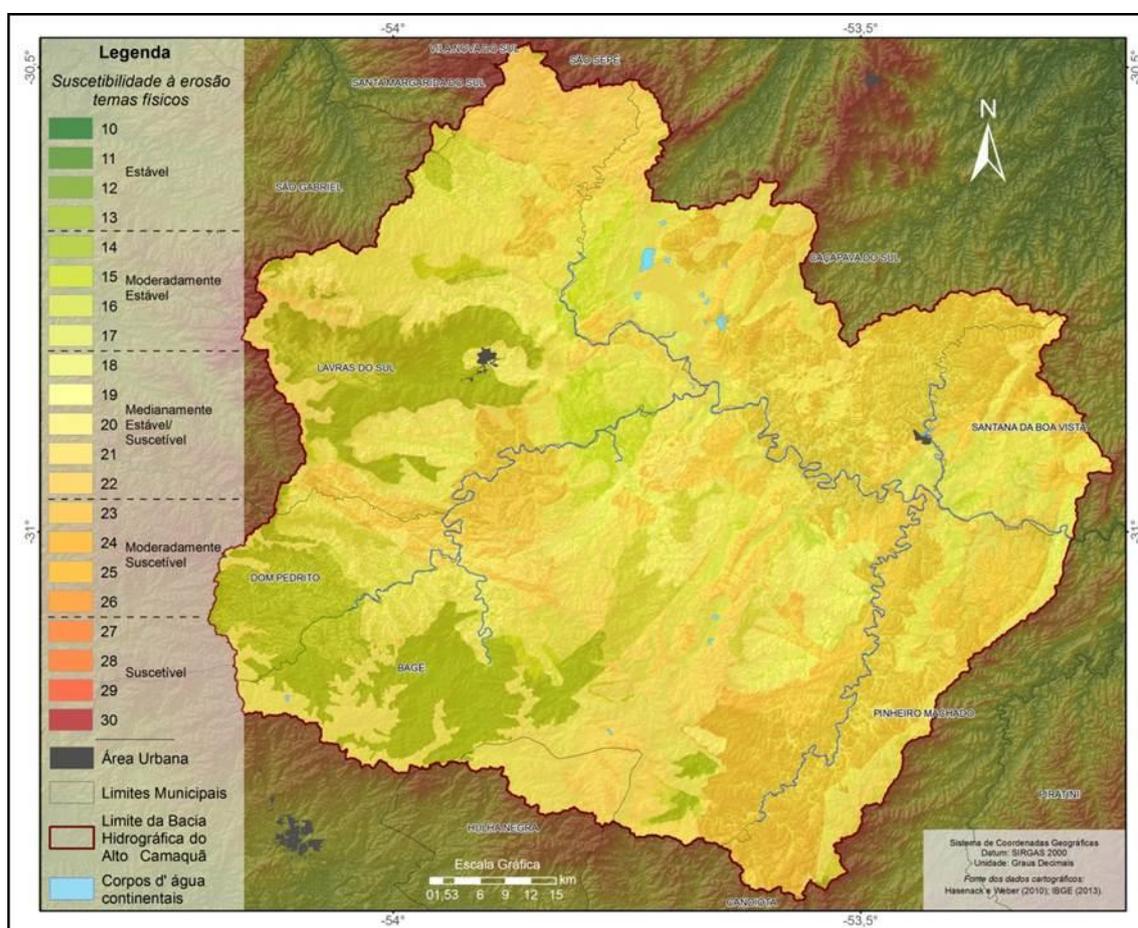
O mapeamento da suscetibilidade dos meios físicos e antrópicos da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã foi gerado a partir da sobreposição, por meio de uma álgebra dos mapas ponderados dos planos de informações de Suscetibilidade do meio físico e suscetibilidade do uso e cobertura da terra. Assim, o resultado pretendido foi gerado na calculadora *Raster* pela soma das proporções de 50%, distribuída igualmente em 16,7% nos planos de Solos, Geologia, Geomorfologia e 50% para as classes de suscetibilidade do uso e cobertura da terra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapeamento de suscetibilidade Física à erosão, obtido por meio da álgebra dos mapas temáticos de suscetibilidade geológica, geomorfológica e pedológica, possibilitou a avaliação dos níveis de suscetibilidade/estabilidade dos elementos físicos da bacia hidrográfica. Estes níveis compreenderam, principalmente, em 53,24% a classe “medianamente estável/suscetível”, além das classes “moderadamente estável” (30,77%), “moderadamente suscetível” (15,75%) e “estável” (0,03%). A classe “suscetível” à erosão não foi obtida como resultado da álgebra dos mapas temáticos.

Na figura 2 é possível observar a expressiva separabilidade das classes de suscetibilidade presente nas porções leste, centro-oeste e norte da bacia hidrográfica, com maiores predisposições à erosão, em relação às demais áreas, que apresentam uma maior estabilidade natural à erosão.

Figura 2: Mapa de suscetibilidade física à erosão na Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã



Elaboração: O autor

O processo de classificação digital do mosaico de imagens Landsat permitiu delinear e quantificar os principais usos e coberturas da bacia hidrográfica do Alto Camaquã (5.126,16km² de área total) (Figuras 3). Na Figura 3 as classes de usos e coberturas da terra adotadas para a BH, estão exemplificadas.

Figura 3: Exemplos das classes de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã no ano de 2015.



Elaboração: O autor

Foi identificado que a área de estudo em 2015 encontrava-se predominante ocupada por atividades pastoris, que totalizam 2.773,7km² correspondendo pouco mais da metade de sua área (54,1%). A classe “Florestal” ocupava aproximadamente 20,1% (1.028,9km²) da área total, as “lavouras temporárias” com 617,8km² (12,05%), o “solo exposto” com 358,8km² (7%), e o “afloramento rochoso” com 166,7km² (3,25%), enquanto a “silvicultura” e os “corpos d’água e Área urbana” revelaram-se pouco expressivas, abrangendo apenas 3,12% (160,1km²) e 0,4% (19,7km²) respectivamente.

Os pontos planimétricos com dados de observações empíricas à lócus e informações da classificação, quando submetidos ao teste Kappa retornaram um índice de 87%, uma força de concordância considerada muito boa (ARONOFF, 1982; CONGALTON, 1991), (Quadro 1). Foram corroborados 655 pontos analisados e discordados apenas 64.

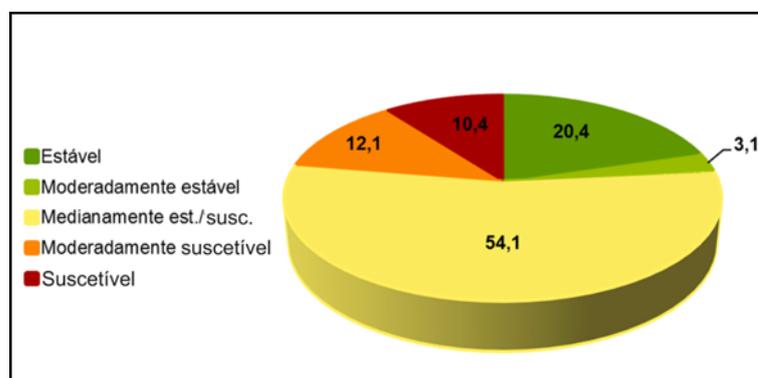
Quadro 1: Matriz de confusão entre dados obtidos em campo e classificação automática. Onde: (1): classe “Água”; (2): “Área urbana”; (3): “Lavouras Temporárias”; (4): “Florestal”; (5): “Silvicultura”; (6): “Campestre”; (7): “Solo exposto” e (8): “Afloramento rochoso” e Teste *Kappa*

Dados de Campo	Classificação Supervisionada MaxVer em Landsat OLI 8								Σ
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
(1)	4					3	1		8
(2)		8					1		9
(3)			61			2	11		74
(4)			1	175	1	3			180
(5)			1	3	50	1	11		66
(6)			7	1	9	311	5		333
(7)						1	37		38
(8)						2		9	11
Σ	4	8	70	179	60	323	66	9	719
Índice Kappa			Erro padrão			Índice de concordância 95%			
0,87			0,02			(0,845 - 0,904)			

Elaboração: O autor.

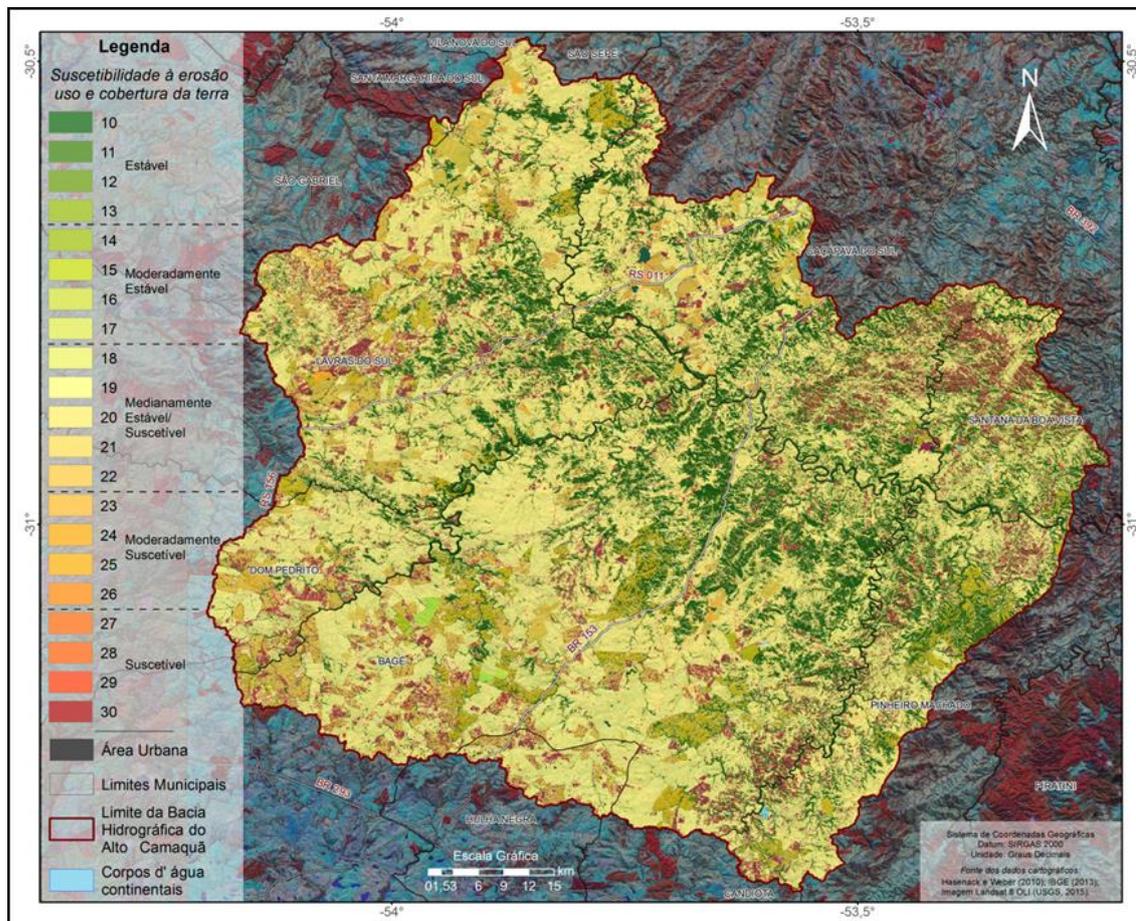
O mapa de suscetibilidade à erosão da área de estudo possui predomínio da classe “20”, medianamente estável/suscetível, com 54,11%. A classe estável foi constituída, em geral, pela categoria “Florestal” com representatividade de aproximadamente 20,1% da bacia hidrográfica. Todavia as “lavouras temporárias” perfazem 12,05% moderadamente suscetíveis e as classes “Afloramento rochoso”, na porção leste, “Solo exposto”, porção oeste, e “Área urbana”, por não apresentarem cobertura vegetal, caracterizam a classe “suscetível” com 10,25% da área total da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã (Figuras 4 e 5).

Figura 4: Distribuição das classes de suscetibilidade antrópica e de cobertura da terra.



Elaboração: O autor

Figura 5: Mapa de suscetibilidade do uso e da cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã



Elaboração: O autor

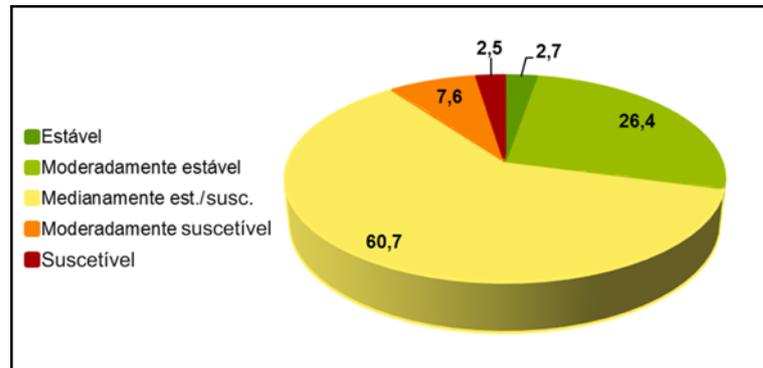
O mapeamento de suscetibilidade à erosão, resultante da média entre a suscetibilidade dos elementos físicos e a suscetibilidade do uso e da cobertura da terra, possui 18 classes. A classe com maior expressão foi a 20, ocupando 19,5% da área total estudada. Na figura 6 é possível observar que as classes intermediárias foram mais representativas, por outro lado os níveis extremos e as categorias limítrofes apresentaram pequenas áreas de abrangência na bacia hidrográfica.

Quando agrupadas, a categoria “medianamente estável/suscetível” ocupou um total de 60,7%, mais da metade da área da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã. A classe “moderadamente estável”, por sua vez, foi quantificada em 26,4%. Já as classes “moderadamente suscetível”, “estável” e “suscetível” apresentaram 7,6%, 2,7% e 2,5% respectivamente (Figura 6).

A classe “estável” representada na Figura 6 resulta, principalmente, das coberturas “Florestal”, “Campestre” e ainda “Silvicultura” sobre áreas com baixa suscetibilidade, ou seja, estabilidade dos aspectos físicos. Esta estrutura compreende um uso estável sobre uma área estável.

Nesse sentido, a classe “moderadamente estável” está representada, assim como a categoria “medianamente estável/suscetível”, homogeneizada em toda a área de estudo com maior destaque para a região central. O nível “moderadamente suscetível” situa-se principalmente em áreas planas com solo exposto, na região norte e oeste, onde o cultivo de lavouras temporárias é predominante e também na porção leste, caracterizada por altas declividades. Já a classe “suscetível”, com atuação quase insignificante em relação a área total, foi destacada pela presença de afloramentos rochosos sobre áreas suscetíveis quanto aos aspectos físicos presente no leste da bacia hidrográfica (Figura 7).

Figura 6: Distribuição das classes de suscetibilidade física e antrópica da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã



Elaboração: O autor

Figura 7: Mapa de suscetibilidade à erosão física e antrópica da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã



Elaboração: O autor

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da suscetibilidade à erosão da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã tenderam à “estabilidade/suscetibilidade mediana”, contudo, a avaliação dos parâmetros físicos e antrópicos

analisados separadamente discreparam duas regiões, na região oeste os aspectos físicos tendem à estabilidade e os aspectos antrópicos à suscetibilidade, caracterizados pela mecanização agrícola sobre relevo plano à suave ondulado. Na região leste, o meio físico tende à suscetibilidade e o uso da terra à estabilidade, cujo relevo apresenta, em grande parte, alta declividade e presença de morros com afloramento rochoso, condições inaptas às atividades agrícolas intensivas.

O modelo de suscetibilidade à erosão aplicado por ferramentas de geoprocessamento, produtos e técnicas de sensoriamento remoto mostrou-se eficaz para a identificação das áreas com pré-disposições morfogenéticas ou pedogenéticas.

O déficit de informações climáticas sobre a área de estudo impossibilitou a avaliação da suscetibilidade aos eventos pluviométricos e de temperatura.

Este trabalho fornece subsídios para ser replicado em estudos de qualquer bacia hidrográfica, principalmente com altas declividades ou usos suscetíveis, de forma a contribuir no planejamento, preservar os recursos naturais e prevenir desastres, possibilitando também avaliar quais são os fatores influenciados por uma grande entrada de energia.

Recomendam-se estudos de Potencialidade Social, pois complementariam a pesquisa para o zoneamento ecológico econômico (ZEE) desta bacia hidrográfica.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de estudos de Pós-Graduação, ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia e ao Laboratório de Planejamento Ambiental da Embrapa Clima Temperado pelo apoio neste estudo.

REFERÊNCIAS

- CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. **Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. 1998. p. 59-82.
- CHANDER, G., MARKHAM, B.L., HELDER, D.L. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- CHAVEZ, P.S JR. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 9, p. 459-479, set. 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- CHRISTOFOLETTI, A. **Condicionantes geomofológicos e hidrologicos aos programas de desenvolvimento**. In: Tauk, S. M. (Org.) *Análise ambiental: Uma visão multidisciplinar*. 2 ed. São Paulo: UNESP, p. 104 – 106, 1995.
- COHEN, J. A., 1960. Coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, 20: 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- COSTA, S. M. F.; MANTOVANI, A. C. M.; JUNIOR, R. N. **Estudo de Compatibilidade entre Crescimento Urbano e Aptidão Física Utilizando Geotecnologias—um estudo de caso**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. 2000.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. DE; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. (INPE-8454-RPQ/722). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; L.G.; AZEVEDO, L.G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos. INPE, maio de 1996, 18p. (INPE- 6145-PUD/028).
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). **ArcGIS Desktop 10.2.2 Redlands (CA)**, 2014.1 CD-ROM.
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: Cunha, S. B. *Geomorfologia e meio ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 337-379.

HASENACK, H.; CORDEIRO, J.L.P. (org.). **Mapeamento da cobertura vegetal do Bioma Pampa**. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. 30 p. (Relatório técnico Ministério do Meio Ambiente: Secretaria de Biodiversidade e Florestas no âmbito do mapeamento da cobertura vegetal dos biomas brasileiros). 2006.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) **Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS/Centro de Ecologia.2010.1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Geomorfologia – 1:250.000**. 2012a. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/geomorfologia/>. Acesso em: 15 ago. 2014.

_____. **Manual técnico de uso da Terra**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Pedologia – 1:250.000**. 2012b. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/pedologia/>. Acesso em: 10 ago. 2014.

_____. **Mapeamento topográfico**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias>. Acesso em: 2 Nov. 2014.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365-2407. 2004. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>

MIURA, A. K.; MIURA, G. M.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de Mudanças no Uso das Terras no Município de Pelotas (RS, Brasil) no período de 1985 a 2007, por meio de Processamento Digital de Imagens. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5997-6004. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.21.36.34/doc/5997-6004.pdf>. Acesso em 17 de novembro de 2014.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <<http://glovis.usgs.gov/>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

PISSARRA, T. C. T. **Avaliação quantitativa das características geomorfológicas de microbacias hidrográficas 1º ordem de magnitude em quatro posições do sistema natural de drenagem**. 1998. 124 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1998.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.2, p. 297-305, 2004.

PRUSKI, F. F.; AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, J. M. A. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 240 p.

RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p. 3469-3481, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>

ROSS, J. L. S. “Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados”. In: **Revista do Departamento de Geografia** n°8, FFLCH-USP, São Paulo, 1994. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>

SONG, C.; WOODCOCK, C.E.; SETO, K. C., LENNEY M., P., MACOMBER, S., A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n. 2.p. 230- 244, 2001.

STRAHLER, A.H. The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.10, n.2, p. 135-163, 1980. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90011-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90011-5)

TEIXEIRA, M.B.; COURA NETO, A.B.; PASTORE, U.; RANGEL FILHO; A.L.R. 1986. Vegetação. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. Estudo fitogeográfico. In: **Levantamento de recursos naturais**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, v. 33, p.541-632.

THOMAZIELLO, S. Sobre a qualidade ambiental. In: SANTOS, R. F. dos (org.) **Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?**. Brasília: MMA, 2007. 192p.

USGS (United States Geological Survey). **Landsat Program**. Disponível em: <<http://glovis.usgs.gov/>>. Acesso em: 03 jan. 2015.

WEILL, M. de A. M.; PIRES NETO, A. G. Erosão e assoreamento. In: SANTOS, R. F. dos (org.) **Vulnerabilidade Ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?**. Brasília: MMA, 2007. 192p.

WILDNER, W.; RAMGRAB, G. E.; LOPES, R. C.; IGLESIAS, C. M. (org) F. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2008. 1 DVD. Escala 1:750.000. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/media/>>. Acesso em: 01 out. 2014.

Recebido em: 03/10/2016

Aceito para publicação em: 09/08/2017