



APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA ¹

APPLICATION OF CONTINUOUS FUZZY CLASSIFICATION METHOD FOR MAPPING TERRAIN FRAGILITY REGARDING THE OCCURRENCE OF GULLIES IN THE SERRA DA CANASTRA NATIONAL PARK

Cassiano Gustavo Messias², Marcos César Ferreira³

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar o mapeamento da fragilidade ambiental em relação à ocorrência de ravinas no Parque Nacional da Serra da Canastra (Sudoeste do estado de Minas Gerais, Brasil), por meio de um modelo espacial baseado em lógica fuzzy e sistema de informação geográfica (SIG). O modelo combina mapas das variáveis ambientais índice de vegetação, densidade de lineamentos estruturais, densidade de vias de circulação e declividade do terreno, a um mapa de pontos de ravinamento identificados em imagens de alta resolução espacial. É utilizado o teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS), para avaliar a aderência entre a distribuição espacial dos valores das variáveis geoambientais e a distribuição espacial das ravinas identificadas no parque. O mapa de fragilidade ambiental produzido é representado em valores fuzzy, indicando a afinidade do pixel à ocorrência de ravinas. A análise é contextualizada segundo sub-bacias hidrográficas do alto São Francisco, e unidades de planejamento Chapadão da Canastra e Chapadão da Babilônia. Os resultados mostraram que a ordem de importância das variáveis em relação à ocorrência de ravinas no parque é a seguinte: densidade de lineamentos estruturais; índice de vegetação; densidade de estradas e declividades. As áreas com maiores fragilidades concentram-se nas sub-bacias localizadas a noroeste e na área central do Chapadão da Babilônia. As áreas com graus menores de fragilidade são mais frequentes no Chapadão da Canastra e em alguns locais situados a sudeste do Chapadão da Babilônia.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento de riscos; teste Kolmogorov-Smirnov; Parque Nacional da Serra da Canastra; Fragilidade Ambiental; Lógica Fuzzy

ABSTRACT

The aim of this work was to map environmental fragility of Serra da Canastra National Park, located in Southwest region of Minas Gerais state, Brazil, using ravine sites identified on high spatial resolution images, as terrain true controls points. The methodology used for mapping was based on fuzzy logic model and GIS techniques. The model combines four environmental variables maps, as follows: vegetation index, structural lineaments density, roads density and terrain slope. Kolmogorov-Smirnov (KS) statistical test was used to evaluate adherence between spatial distribution of environmental variables values and spatial distribution of ravines sites. Environmental fragility was mapped using linear membership fuzzy function, and evaluated upon third and fourth orders hydrographic basins. The results showed that ravine sites are mainly associated to the structural lineaments density, followed by vegetation index, road density and terrain slope. The most of higher environmental fragility hydrographic basins are located in the Chapadão da Babilônia landscape unit.

KEY-WORDS: Risk mapping; Kolmogorov-Smirnov test; Protected Areas; Environmental Fragility; Fuzzy Logic

Recebido em: 31/08/2015. Aceito em: 09/12/2016.

¹ Fonte de financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo nº 2012/07795-6)

² UNICAMP, Campinas/SP, e-mail: cassianomessias@ige.unicamp.br

³ UNICAMP, Campinas/SP,, e-mail: macferre@ige.unicamp.br

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

1. INTRODUÇÃO

Os solos estão em frequente dinâmica e são desgastados constantemente por fatores hídricos e eólicos. Com o passar dos milênios, partículas movem-se transformando a paisagem. Entretanto, com a intensificação das atividades humanas, os processos naturais foram acelerados, principalmente pelo uso indiscriminado dos solos, resultante da agricultura. Como consequência, a erosão passou a ser um dos principais fatores de degradação da paisagem, responsável pela perda de milhões de hectares de terras.

A erosão do solo é um problema global recorrente e uma das principais ameaças ambientais, que tem prejudicado o desenvolvimento sustentável de várias sociedades (FENG et al., 2010; XU et al., 2012). A erosão é um dos principais fatores que contribuem à degradação dos solos (BISSONNAIS et al., 2001). Os processos erosivos podem gerar inúmeros problemas socioambientais, dentre eles, a redução de nutrientes na camada superficial dos solos, a diminuição das áreas agrícolas, o assoreamento de corpos d'água e o transporte de defensivos agrícolas (JORGE; GUERRA, 2013).

Com o avanço no uso dos sistemas de informação geográfica (SIG), modelos de erosão dos solos passaram a adotar representações explícitas das áreas de ocorrência de desses eventos, baseadas em parâmetros espacialmente distribuídos, que mostram a variabilidade dos processos (FENG et al., 2010). A análise da distribuição espacial do risco à erosão do solo deve ser considerada como procedimento fundamental para o controle da erosão e proteção do ambiente ecológico (WANG et al., 2013). Neste sentido, diversos autores buscaram desenvolver modelos e métodos para mapear e identificar áreas suscetíveis a esta forma de degradação da paisagem.

No Brasil, os métodos mais utilizadas para o mapeamento da fragilidade ambiental foram desenvolvidas por Ross (1994) e Crepani et al. (2001). O método de, Ross (op. cit.) empenha-se em estimar a estabilidade das diferentes

Unidades Ecodinâmicas - conceito desenvolvido por Tricart (1977) - baseada na combinação entre variáveis naturais e antrópicas, como solos, relevo e uso do solo, por meio de operações de média aritmética. Crepani et al. (2001) apresentaram uma metodologia para a geração de cartas de vulnerabilidade natural à erosão, utilizada na primeira fase do zoneamento ecológico econômico da Amazônia Legal, realizado na década de 1990. Baseando-se também no conceito de Ecodinâmica (TRICART, op. cit), são relacionadas, por meio de média aritmética, variáveis como geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal e climatologia.

Além destas abordagens já amplamente difundidas, outros autores têm proposto alternativas para o mapeamento da fragilidade em áreas onde dados pedológicos e de uso da terra não estejam disponíveis em escalas cartográficas detalhadas. Estas alternativas podem ser baseadas em modelos de análise geoespacial, que consideram o arranjo espacial dos processos e a sua associação espacial com outras variáveis (FERREIRA et al., 2014; GARÓFALO, FERREIRA, 2015).

Tanto a metodologia de Ross (1994), como a de Crepani et al. (2001), baseiam-se na classificação de intervalos booleana. A principal limitação é a perda do detalhamento e da complexidade natural das variáveis geoambientais, geradas pela rigidez nos limites de classe atribuídos aos fenômenos espaciais (FERREIRA et al., 2014). Esta limitação pode ser evitada com a utilização do método de classificação contínua nebulosa, ou fuzzy. Este método não representa os limites das classes como fronteiras rígidas e permite a adesão parcial de elementos às várias classes, com diferentes graus de afinidade, calculados por uma função de afinidade (WANG et al., 1990).

As variáveis geoambientais podem contribuir com diferentes graus de intensidade para a formação de processos erosivos. Por esta razão, a atribuição de pesos às variáveis é uma das etapas mais importantes da modelagem espacial da fragilidade. Estes pesos não podem

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

ser atribuídos de forma subjetiva ou apenas hierárquica. Uma alternativa para a obtenção dos valores destes pesos é o uso do teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS), que permite avaliar dados não paramétricos, gerando valores que indicam a dependência entre duas variáveis, baseando-se em uma amostra mapeada empiricamente e outra hipotética (YOUNG, 1977). Este teste pode ser aplicado para a avaliação do grau de aderência entre a distribuição dos valores de uma variável geoambiental e a distribuição da quantidade de pontos de erosão. Este grau de aderência pode ser utilizado como peso nas operações de álgebra de mapas (GARÓFALO; FERREIRA, 2015).

O objetivo deste trabalho é identificar os graus de fragilidade à ocorrência de ravinas em sub-bacias hidrográficas que integram o Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC). Esta Unidade de Conservação (UC), localizada a Sudoeste de Minas Gerais e criada em 1972, é uma área conservada em diversidade de fauna e

flora do cerrado, de grande beleza cênica, de amplo potencial turístico, apresenta extensa rede de drenagem e protege as nascentes dos rios São Francisco e Araguari. Entretanto, apesar de sua importância, o Parque apresenta vários problemas ambientais, sobretudo os ravinamentos. Para atingir o objetivo, foi utilizado o processo classificatório fuzzy e atribuídos pesos às variáveis geoambientais, calculados por meio do teste Kolmogorov-Smirnov. Os resultados desta metodologia poderão ser úteis ao planejamento e ao manejo de sub-bacias situadas no PNSC.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Localizado a sudoeste do estado Minas Gerais, Brasil, o PNSC está inserido nos municípios de São Roque de Minas, Sacramento, Delfinópolis, São João Batista da Glória, Capitólio e Vargem Bonita (Figura 1).

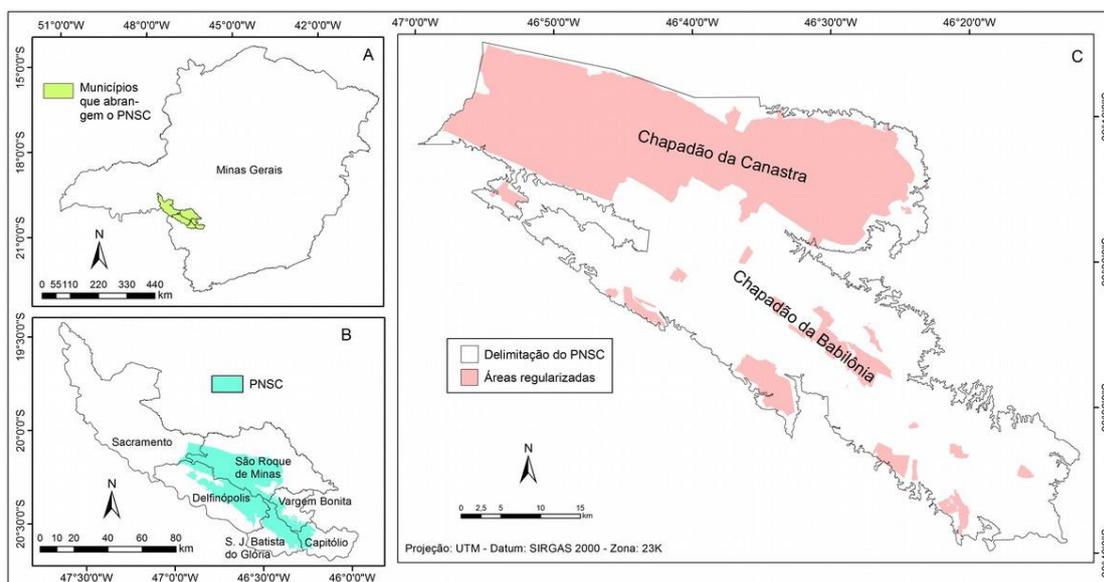


Figura 01 - Localização do PNSC e dos municípios nele inseridos, em Minas Gerais (A); distribuição do PNSC nos territórios municipais (B); e, distribuição das áreas regularizadas do PNSC (C).

O PNSC foi criado em 1972, com área de 197.7975 ha (BRASIL, 1972). Em 1977 foi realizado o primeiro levantamento topográfico,

quando foi excluído o Chapadão da Babilônia, restando 71.525 ha correspondentes apenas ao Chapadão da Canastra. No plano de manejo de

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

2005, o Chapadão da Babilônia foi novamente incluído no território do parque, mas sem a devida regularização fundiária (MMA; IBAMA, 2005). Atualmente há o conflito entre conservação e desenvolvimento econômico nesse local, o que tem levado a proposições de exclusão de algumas áreas do parque.

O PNSC está inserido no domínio fitogeográfico do cerrado (COUTO JUNIOR et al., 2010), configurando-se como importante refúgio de fauna e flora. A temperatura média no parque é de 21°C; no inverno é inferior a 18°C, e, no verão, oscila entre 22°C e 24°C. O clima corresponde ao tipo Cwb de Köppen (IBDF; FBCN, 1981). A rede de drenagem no parque é constituída por rios pertencentes a três diferentes bacias hidrográficas: São Francisco, Grande e Paranaíba (MMA; IBAMA, 2005).

A Serra da Canastra caracteriza-se como serra residual, localizada na face sul dos planaltos

e serras Goiás-Minas, associados à faixa de dobramentos de Brasília (ROSS, 1985). A leste do Chapadão da Canastra, predominam Neossolos Litólicos associados a afloramentos rochosos; a noroeste, os Cambissolos; em depressões intermontanas surgem os Latossolos; nas zonas elevadas do Chapadão da Babilônia, os Plintossolos Argilúvicos; e nas mais baixas os Cambissolos (CETEC; FEAM, 2010). Nos diferentes ambientes são identificadas ravinas, voçorocas, movimentos de massa, compactação do solo e assoreamento (MMA; IBAMA, 2005).

2.2 MATERIAL

Os dados utilizados nesta pesquisa encontram-se descritos na Tabela 1. A produção dos mapas temáticos e análise dos dados foram executadas nos softwares ArcGIS 10.1, Google Earth Pro e LibreOffice 3.6.

Tabela 01 - Material cartográfico e de sensoriamento remoto utilizados.

Produto	Órbita e Ponto	Resolução Espacial	Data	Fonte
ASTER GDEM 1	S21W047	30m	2009	USGS
Imagens Google Earth	*	1,6m	2011	Google
<i>Landsat</i> (LDCM / OLI)	219/74 220/74	30m	15/05/2014 22/05/2014	USGS
Limites do PNSC (vetor)	-	-	2016	ICMBio

*O Google Earth é formado por um mosaico de imagens. As informações de órbita e ponto das imagens de origem não são disponibilizadas

2.3 METODOLOGIA

A Figura 2 mostra o fluxograma que sintetiza os procedimentos metodológicos para a

geração dos grupos utilizados no mapeamento da fragilidade à ocorrência de ravinas no PNSC.

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

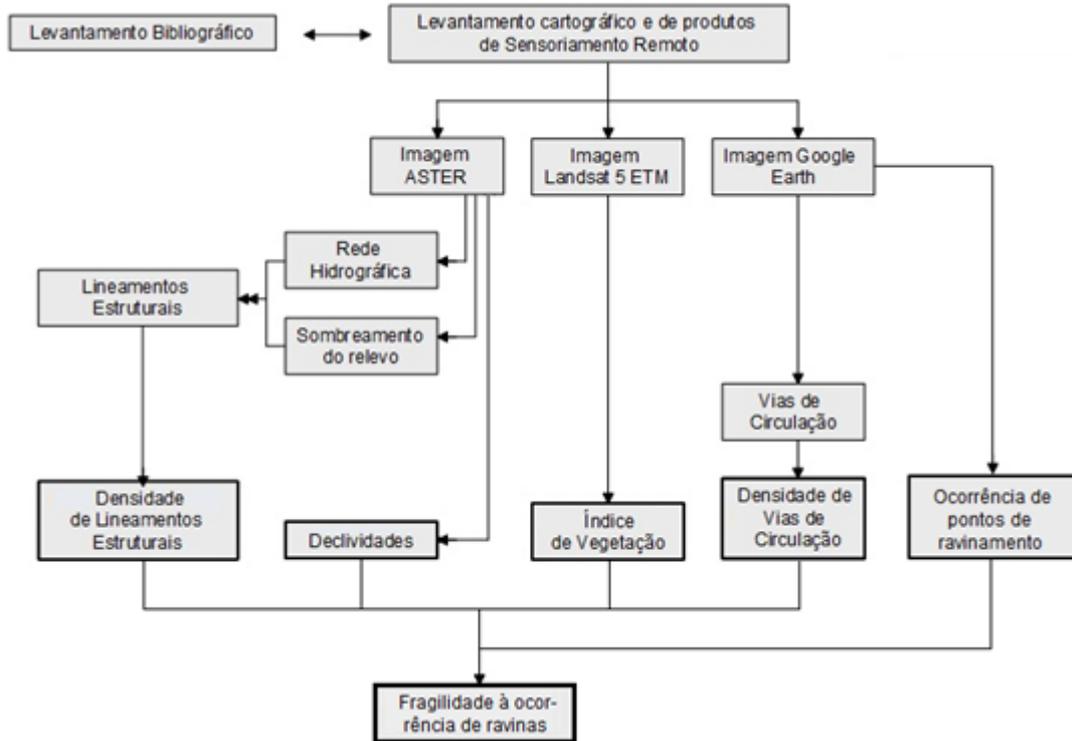


Figura 02 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizado para o mapeamento da fragilidade à ocorrência de ravinas no Parque Nacional da Serra da Canastra – MG.

2.3.1 MAPA DE OCORRÊNCIA DE RAVINAS

Analisando-se uma área amostral do PNSC na plataforma interativa Google Earth e estudos realizados anteriormente (MMA; IBAMA, 2005), constatou-se que as ravinas são os

processos mais frequentes no PNSC – fato que justifica a relevância deste trabalho. A partir desta área amostral foi construída uma chave para a interpretação visual e o mapeamento das ravinas (Quadro 1).

Quadro 01 - Chaves de interpretação para a identificação de ravinas em imagens Google Earth

Elementos de interpretação	Feições observadas nas imagens
<p><u>Ravinas:</u> Processos lineares, de forma retilínea, alongada, estreita e de largura superior a 50cm (SANTORO, 2012; GARÓFALO; FERREIRA, 2015).</p>	

Na plataforma Google Earth, inicialmente foi associado o arquivo vetorial dos limites do PNSC e, em seguida, traçada uma

grade com quadrículas de 600 x 600 m. Esta grade foi utilizada para a identificação visual,

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

controle e digitalização dos pontos de ravinas observados nas imagens do Google.

As imagens da plataforma Google Earth, com os pontos de localização das ravinas sobrepostos, foram exportadas para o ArcGIS, em formato JPEG de alta resolução (4.800 x 4.800 pixels). Essa imagem foi registrada, corrigindo-se possíveis distorções, utilizando pontos de controle definidos a partir de feições da rede de drenagem, obtidas nas cartas topográficas do IBGE. Por fim, os pontos de localização de ravinas foram redigitalizados e convertidos em um arquivo vetorial de pontos. Foram realizadas visitas a campo, para checar pontos com dúvida na interpretação visual.

2.3.2 MAPA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal reduz fortemente a ocorrência de processos erosivos (JANSSON, 1982). A ausência deste tipo de cobertura permite que as gotas de chuva se choquem diretamente com o solo, aumentando a ação erosiva da pluviosidade (LOURENÇO, 2004). As ravinas são mais frequentes em superfícies desprovidas de vegetação, em terras de agricultura ou em locais onde a vegetação foi perturbada (BIGARELLA, 2007). O índice de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (ROUSE et al. 1974) é um importante indicador quantitativo do teor de biomassa na superfície e do grau de cobertura do solo. O uso deste índice é uma alternativa útil para sua substituição da tarefa complexa e subjetiva de atribuir diferentes graus de proteção do solo a classes de uso e cobertura da terra.

Para o cálculo do NDVI foram utilizadas imagens do sensor Operational Land Imager (OLI) corrigidas geometricamente, em órbita no satélite Landsat 8. Foi realizada a correção atmosférica pelo método Dark Object Subtraction (DOS) (CHAVEZ Jr., 1989). O ajuste radiométrico entre as cenas foi realizado por meio de regressão linear, utilizando-se os valores de refletância de amostras de um mesmo tipo de uso do solo, em duas cenas vizinhas. Aplicando-se a equação de regressão obtida, foi gerado o

mosaico com as duas cenas que cobrem a área. O NDVI foi calculado pela Equação 1:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

onde ρ_{NIR} é o valor de refletância do infravermelho próximo e ρ_{Red} é o valor de refletância do vermelho. Os valores de NDVI foram calculados pixel a pixel pelo módulo Raster Calculator, do ArcGis 10.1, com as bandas 5 – NIR (0,845 – 0,885 μm) e 4 – Red (0,630 – 0,680 μm), do sensor OLI.

2.3.3 MAPA DE DECLIVIDADES

À medida que a inclinação é maior, há o aumento do coeficiente de escoamento, da energia cinética e da capacidade de fluxo, aumentando também a probabilidade de ocorrer erosão do solo (ZACHAR, 1982). No entanto, em encostas demasiadamente íngremes, devido ao decréscimo de materiais disponíveis, as taxas de erosão diminuem (MORGAN, 1986).

O mapeamento da declividade (DEC) foi realizado também pelo ArcGIS 10.1, pela função Slope, utilizando-se como base de dados altimétricos o modelo digital de elevação do ASTER GDEM 1. Os valores da declividade em um pixel, representados em graus, foram calculados com base na taxa de variação máxima da elevação z em relação aos pixels vizinhos (ESRI, 2013).

2.3.4 MAPA DE DENSIDADE DE VIAS DE CIRCULAÇÃO

A falta de manutenção e a imprecisão dos projetos de drenagem, são as principais causas da grande incidência de processos erosivos em estradas rurais (SALOMÃO, 1999). A erosão predominante ao longo das estradas é do tipo linear, como ravinas e voçorocas (SILVA et al., 2004).

O mapa das vias de circulação foi produzido a partir da identificação visual de estradas e trilhas em imagens georreferenciadas, extraídas Google Earth Pro. No ArcGIS 10.1, foram digitalizadas as vias e criado um arquivo

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

vetorial de linhas, com todas as categorias de vias existentes no PNSC. A densidade de vias de circulação (DVC) foi mapeada também no ArcGIS 10.1, por meio do estimador Kernel, na função Kernel Density.

2.3.5 MAPA DE DENSIDADE DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS

Zonas de fraturamento são facilmente atacadas pelos processos meteóricos e erosivos, constituindo zonas de desenvolvimento preferencial de linhas de drenagem (SOARES; FIORI, 1978). A passagem de água ao longo destas fraturas causa a expansão vertical e lateral dos mesmos, expandindo a zona de influência do intemperismo (MEIJERINK, 2007).

Os lineamentos estruturais foram identificados visualmente, combinando-se os mapas da rede hidrográfica e do sombreamento do relevo. A hidrografia foi extraída do modelo digital de elevação ASTER, executando-se uma sequência de procedimentos do módulo Hydrology do ArcGIS 10.1. O mapa de sombreamento do relevo foi produzido pelo aplicativo Hillshade. A densidade de lineamentos (DLI) foi calculada pela ferramenta Kernel Density.

2.3.6 MAPEAMENTO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

O uso da unidade hidrográfica bacia, se ajusta perfeitamente à sistemática de gestão, dando a possibilidade de desenvolvimento de melhores diagnósticos e planejamento adequado dos recursos naturais (FITZ, 2008).

Em nosso trabalho, foram mapeadas as sub-bacias de terceira e quarta ordens, definidas pelo método hierárquico de Strahler (1957), por meio de interpretação visual de cartas topográficas e posterior digitalização das linhas interfluviais, traçadas com apoio das cotas altimétricas.

2.3.7 MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

Uma das principais características da metodologia de mapeamento da fragilidade

ambiental utilizada neste artigo, é o uso do teste estatístico Kolmogorov-Smirnov (KS) para a obtenção de pesos às variáveis geoambientais que influenciam os processos erosivos. O teste KS foi aplicado para se determinar a aderência entre duas funções: uma derivada empiricamente (H1) e outra hipotética (H0), considerando o erro de amostragem entre elas (YOUNG, 1977). Neste sentido, foram utilizadas duas hipóteses:

- H0: a ocorrência de ravinamentos não é influenciada por variáveis geoambientais.
- H1: a ocorrência de ravinamentos é influenciada por variáveis geoambientais.

A aplicação do teste KS neste trabalho baseou-se no procedimento apresentado por Taylor (1977), adaptado a funções de modelagem de mapas em SIG. Primeiramente, os mapas das variáveis geoambientais foram classificados em quatro classes por meio da técnica de classificação dos quartis (quatro classes com áreas muito semelhantes). Em seguida, cada uma das quatro classes destes mapas foi desagregada em polígono independente.

Estes polígonos foram utilizados como máscara para extração do número total de pontos de ravinamentos que ocorreram dentro da área coberta por cada classe de geovariável ambiental. O número de eventos empiricamente mapeados em cada classe representa, então, a ocorrência observada de ravinamentos em cada intervalo de dados, para cada variável geoambiental (H1). Em seguida foram calculadas as ocorrências esperadas (H0), supondo-se que não houvesse influência das variáveis geoambientais no ravinamento – ou seja, a quantidade de ravinamentos é proporcional ao tamanho da área de cada classe.

O teste KS compara duas distribuições de frequências acumuladas – esperada (FAC ES) e a observada (FAC OB) – e estima o grau de aderência entre ambas, por meio do cálculo da diferença (D), em módulo, entre os valores das classes cumulativas colocadas em ordem crescente. Para se avaliar o grau de aderência entre as duas distribuições compara-se o valor

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

máximo de D calculado ($D_{m\acute{a}x}$) ao valor de D crítico (D_c), a determinado nível de significância. Os valores de D_c podem ser consultados em tabela estatística adequada a este teste, disponível em obras básicas de estatística, ou, em Taylor (1977).

Quanto maior o valor de $D_{m\acute{a}x}$ em relação ao seu D_c , maior será a concentração de eventos em alguma das classes e, portanto, rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 , e pode-se afirmar que há influência da variável geoambiental na ocorrência de ravinas. Por esta razão, o valor de $D_{m\acute{a}x}$ calculado para cada variável geoambiental foi utilizado como referência para a estimativa do peso desta mesma variável no processo de ravinamento.

Considerando-se como referência o nível de significância de $\alpha=0,05$, o valor de D_c foi calculado por meio da seguinte equação:

$$D_c(\alpha = 0,05) = \frac{1,36}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

onde n é o número de eventos de ravina.

Os mapas das variáveis geoambientais produzidos, apresentados nos resultados deste artigo, foram convertidos para a escala de valores fuzzy [0,0 - 1,0], por meio da opção fuzzy membership do ArcGIS 10.1. Neste caso, foi utilizada a função linear, que atribuiu 0,0 para o mínimo valor de cada variável e 1,0 para o valor máximo. Com relação aos mapas de densidade de lineamentos estruturais, vias de circulação e de declividades, o pixel de valor 0,0 está associado à baixa fragilidade, e 1,0 à alta. Para o mapa do índice de vegetação consideramos que os menores índices estão relacionados a menores quantidades de biomassa (áreas mais frágeis), e os maiores índices associados a maior biomassa (maior proteção à camada superficial). Portanto, o valores fuzzy máximo e o mínimo em relação ao NDVI foram invertidos.

O peso de cada variável geoambiental, por exemplo, índice de vegetação (P_{IV}) foi calculado a partir da normalização de seu respectivo valor de $D_{m\acute{a}x}$ em relação à soma de todas as variáveis (equação 3). O procedimento foi executado para todas as variáveis.

$$P_{IV} = \frac{D_{MAXIV}}{D_{MAXIV} + D_{MAXDCE} + D_{MAXDLI} + D_{MAXDVC}} \quad (3)$$

onde D_{MAXIV} , D_{MAXDEC} , D_{MAXDLI} , e D_{MAXDVC} são respectivamente, valor de D máximo do índice de vegetação (IV); a declividade (DEC); densidade de lineamentos (DLI) e densidade de vias de circulação (DVC).

A fragilidade ambiental em cada pixel (FA) do mapa foi calculado por meio da função raster calculator do ArcMap 10.1, aplicando-se o modelo espacial ponderado da Equação 4:

$$FA = P_{IV} \cdot IV + P_{DCE} \cdot DEC + P_{DLI} \cdot DLI + P_{DVC} \cdot DVC \quad (4)$$

onde P_{IV} , P_{DCE} , P_{DLI} , P_{DVC} são, respectivamente, os pesos das variáveis geoambientais índice de vegetação (IV); declividades (DEC); densidade de lineamentos (DLI) e densidade de vias de circulação (DVC).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo foram mapeadas 1.257 ravinas, que distribuem-se espacialmente por toda a extensão do PNSC, organizando-se em padrão de pontos agregados em determinados locais, onde a frequência é mais elevada.

Através da comparação dos valores de índices de vegetação e observações em campo, constatou-se que a cobertura com maior índice de vegetação (matas) ocupam pequenas extensões do Parque (Figura 3A). Localizam-se predominantemente nas depressões intermontanas do Chapadão da Babilônia e entre escarpas e serras com menores altitudes. No Chapadão da Canastra os maiores índices de vegetação localizam-se em suas bordas ou em áreas mais declivosas.

Os campos sujos e os campos limpos são fitofisionomias predominantes, principalmente no Chapadão da Canastra; estas coberturas, no mês de maio, quando foi captada a imagem, possuíam valores médios de NDVI. Há também campos rupestres, que se desenvolvem entre afloramentos rochosos, com solos rasos, e

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

altitudes mais elevadas (COUTO JUNIOR et al., 2010).

Os menores valores de NDVI foram observados, principalmente, nas áreas escarpadas, em geofácies constituídas por

afloramentos rochosos. Além disto, os baixos valores de NDVI estão associados a áreas agrícolas e pequenos focos de queimada, e a áreas com mineração situadas na porção sudeste deste chapadão (MMA; IBAMA, 2005).

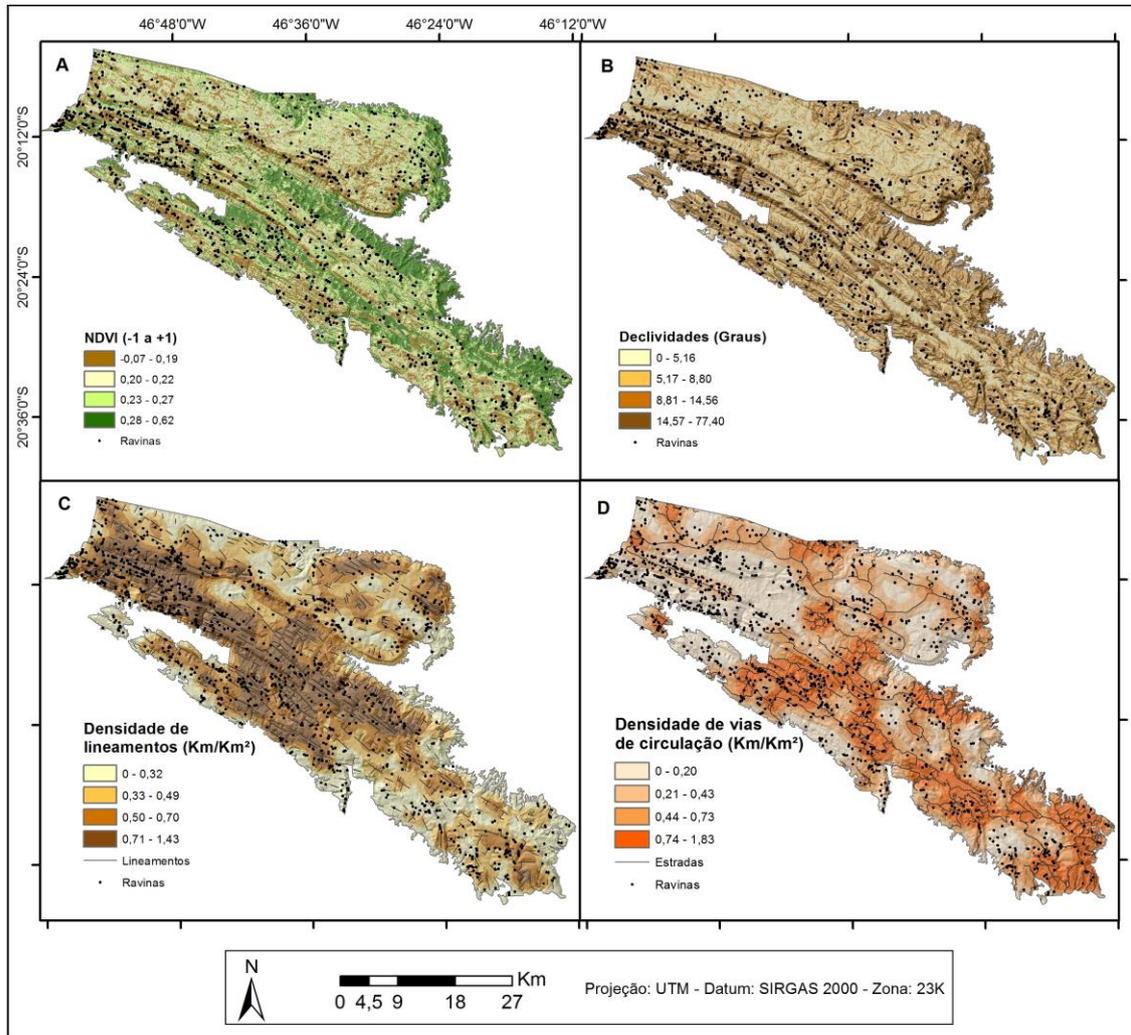


Figura 03 - Mapas da distribuição dos pontos de ravinas no PNSC, em relação ao índice de vegetação (A); declividades (B); densidade de lineamentos estruturais (C) e densidade de vias de circulação (D).

Com relação às declividades (Figura 3B), o Chapadão da Canastra exibe relevos moderadamente planos ou ondulados, visto que, de maneira geral, têm-se topos pouco declivosos e encostas de média declividade. Suas bordas possuem altos declives, formando escarpas, as quais delimitam sua localização. Os resultados corroboram com estudos de

Vasconcelos et al. (2002), que afirmam que o setor noroeste do Chapadão pode ser considerado um ambiente relativamente plano, apresentando declividade média de 12%.

As depressões intermontanas do Chapadão da Babilônia estão localizadas entre os relevos escarpados e apresentam baixas ou médias declividades nos fundos de vale. As

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

declividades mais acentuadas no parque são marcadas em áreas de grande estruturação do relevo, no sentido NW-SE e formando paredões, escarpas e serras. As feições escarpadas são resultados de antigas dobras, falhas e erosões, que originaram morfologias bem irregulares, principalmente nas bordas dos chapadões (SOUZA, 2006).

Devido à forte estruturação do relevo no parque, são verificadas altas densidades de lineamentos estruturais (Figura 3C). As densidades mais elevadas são observadas em um trecho do extremo noroeste do Chapadão da Canastra e nas áreas noroeste e centrais do Chapadão da Babilônia. Estes locais apresentam expressivas diferenças altimétricas, especialmente entre serras e depressões intermontanas, além de declives acentuadas e rios estruturados. No Chapadão da Canastra e no extremo sudeste do Chapadão da Babilônia predominam baixas e médias densidades de lineamentos, havendo também menores diferenças altimétricas e declividades.

O IBDF e FBCN (1981) citam que, na área do PNSC há a evolução de inúmeros processos erosivos observados ao longo das estradas (Figura 3D), ao mesmo tempo em que o MMA e IBAMA (2005) inclui as vias de circulação em uma lista de atividades conflitantes. No Chapadão da Canastra predominam médias ou baixas densidades de vias, associadas a uma estrada principal não pavimentada, de aproximadamente 67km, que

dá acesso a grande parte do chapadão. Contudo, há pontos de alta densidade em locais não regularizados das bordas, assim como em alguns cruzamentos nas zonas centrais.

O Chapadão da Babilônia concentra grande parte das altas densidades de vias de circulação, especialmente nas zonas centrais, onde há inúmeras trilhas em que ocorrem atividades off road, com motos e jipes, e a sudoeste, onde dão acesso às áreas de mineração. Além da grande quantidade de estradas no Chapadão da Babilônia, há o acesso livre, ocasionado pela baixa taxa de regularização fundiária e pela existência de várias propriedades rurais dedicadas à pecuária e pousadas (MMA; IMABA, 2005).

As variáveis geoambientais discutidas (índice de vegetação, declividades, densidade de lineamentos e densidade de vias de circulação) auxiliam na compreensão da distribuição dos pontos de ravinamento no PNSC. A obtenção dos valores de ravinas esperadas e observadas permite-nos associar a ocorrência de ravinas a essas variáveis, considerando que estes processos erosivos são distribuídos de forma irregular ao longo de suas classes. Ou seja, os valores observados variam entre as classes (distribuição não-normal), o que não ocorre com tanta expressividade nos valores esperados (distribuição normal) (Tabelas 2, 3, 4 e 5).

Tabela 02 - Valores de ocorrência observada e esperada de ravinas por classe de índice de vegetação no PNSC (n=1275).

	Classes de NDVI [-1 a 1]			
	0,28-0,62	0,23-0,27	0,20-0,22	(-)0,07-0,19
Proporção em área (%)	24,55	24,95	26,33	24,23
Ravinas observadas	191	354	380	350
Ravinas esperadas	313,08	318,2	335,7	309,01

Tabela 03 - Valores de ocorrência observada e esperada de ravinas por classe de declividades no PNSC (n=1275)

	Classes de declividades (graus)			
	0 - 5,16	5,17 - 8,80	8,81 - 14,56	14,57 - 77,40
Proporção em área (%)	24,56	24,85	26,13	24,44
Ravinas observadas	253	350	309	356
Ravinas esperadas	313,25	316,88	333,22	311,70

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

Tabela 04 - Valores de ocorrência observada e esperada de ravinas por classe de densidade de lineamentos estruturais no PNSC (n=1275).

	Classes de lineamentos estruturais (km/km ²)			
	0 – 0,32	0,33 – 0,49	0,50 – 0,71	0,62 - 1,43
Proporção em área (%)	25,10	24,92	25,43	24,56
Ravinas observadas	227	260	326	462
Ravinas esperadas	320,07	317,68	324,25	313,09

Tabela 05 - Valores de ocorrência observada e esperada de ravinas por classe de densidade de vias de circulação no PNSC (n=1275).

	Classes de densidade de vias (km/km ²)			
	0 – 0,20	0,21 – 0,43	0,44 – 0,73	0,74 – 1,83
Proporção em área (%)	24,76	25,38	25,22	24,66
Ravinas observadas	384	362	233	296
Ravinas esperadas	315,66	323,60	321,49	314,35

Constatou-se que a frequência de ravinas é maior em áreas com baixos valores de NDVI, altos valores de densidade de lineamentos estruturais e de declividades (exceto em locais muito íngremes, em razão redução de material disponível para a remoção pela água). Por outro lado, o maior número de ravinas está concentrado em áreas com menores densidades de vias de circulação. As maiores densidades de vias ocorrem em áreas não regularizadas do PNSC, potencialmente vulneráveis à evolução de ravinas, embora no presente, não sejam ainda as mais atingidas.

Foram aplicadas as FOB e FES, assim como seus fatores acumulativos e a diferença

entre eles (Tabelas 6, 7 e 8 e 9). Verificamos que os valores de DMáx, calculados para todas as variáveis geoambientais, são superiores ao Dc. Estes resultados nos levam a rejeitar a hipótese H0, e assumir que a distribuição espacial das ravinas é não aderente à distribuição normal, e pode ser influenciada por fatores locais associados às variáveis geoambientais.

Em termos de paisagem, isso significa que há relação locacional entre a ocorrência de ravinas, e as variáveis índice de vegetação, declividade e densidade de lineamentos estruturais. Contudo, não foi possível se afirmar o mesmo em relação à variável densidade de estradas.

Tabela 06 - Valores dos parâmetros do teste estatístico KS obtidos para avaliar a aderência entre o índice de vegetação e a ocorrência de ravinas no PNSC (Dcrítico = 0,0380).

Parâmetros Estatísticos	Classes de NDVI (-1 a +1)			
	0,28–0,62	0,23-0,27	0,20-0,22	(-)0,07-0,19
F_{OB}	0,2745	0,2980	0,2776	0,1498
F_{ES}	0,2424	0,2633	0,2496	0,2456
F_{ACOB}	0,2745	0,5725	0,8502	1,0000
F_{ACES}	0,2424	0,5057	0,7553	1,0000
D	0,0321	0,0669	0,0949	0,0000

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

Tabela 07 - Valores dos parâmetros do teste estatístico KS obtidos para avaliar a aderência entre declividades e a ocorrência de ravinas no PNSC ($D_{crítico} = 0,0380$).

Parâmetros Estatísticos	Classes de declividades (graus)			
	0 – 5,16	5,17 – 8,80	8,81 – 14,56	14,57 – 77,40
F_{OB}	0,1984	0,2745	0,2424	0,2847
F_{ES}	0,2457	0,2485	0,2614	0,2445
F_{ACOB}	0,1984	0,4729	0,7153	1,0000
F_{ACES}	0,2457	0,4942	0,7556	1,0000
D	0,0473	0,0213	0,0403	0,0000

Tabela 08 - Valores dos parâmetros do teste estatístico KS obtidos para avaliar a aderência entre densidade de lineamentos estruturais e a ocorrência de ravinas no PNSC ($D_{crítico} = 0,0380$).

Parâmetros Estatísticos	Classes de densidade de lineamentos estruturais (Km/Km ²)			
	0 – 0,27	0,28 – 0,43	0,44 – 0,61	0,62 - 1,34
F_{OB}	0,1780	0,2039	0,2557	0,3624
F_{ES}	0,2510	0,2492	0,2543	0,2456
F_{ACOB}	0,1767	0,3820	0,6376	1,0000
F_{ACES}	0,2439	0,5002	0,7545	1,0000
D	0,0672	0,1182	0,1169	0,0000

Tabela 09 - Valores dos parâmetros do teste estatístico KS obtidos para avaliar a aderência entre densidade de vias de circulação e a ocorrência de ravinas no PNSC ($D_{crítico} = 0,0380$).

Parâmetros Estatísticos	Classes de densidade de vias de circulação (Km/Km ²)			
	0 – 0,20	0,21 – 0,43	0,44 – 0,73	0,74 – 1,83
F_{OB}	0,3012	0,2839	0,1827	0,2322
F_{ES}	0,2476	0,2538	0,2522	0,2466
F_{ACOB}	0,3012	0,5851	0,7678	1,0000
F_{ACES}	0,2476	0,5014	0,7535	1,0000
D	0,0536	0,0837	0,0143	0,0000

Comparando os valores $D_{máx}$ normalizados entre 0 e 1 (Tabela 10) é possível quantificar a importância de cada variável em relação à ocorrência de ravinas. Constatou-se

que o maior peso foi obtido pela densidade de lineamentos estruturais, seguido pelo índice de vegetação, densidade de vias de circulação e as declividades.

Tabela 10. Valores de $D_{máx}$ e dos pesos normalizados (P) das variáveis geoambientais em relação à influência na ocorrência de ravinas no Parque Nacional da Serra da Canastra, MG

	Variáveis geoambientais			
	NDVI	Declividades	Densidade de lineamentos	Densidade de vias
$D_{máx}$	0,0976	0,0476	0,1182	0,0837
P	0,2814	0,1362	0,3409	0,2413

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

onde são encontradas matas densas, baixa densidade de lineamentos, e declives variados. Exemplo disso ocorre nas bacias da Picada (0,076 ravinhas/km²), da Prata (0,194 ravinhas/km²), São Francisco (0,386 ravinhas/km²), Turvo (0,352 ravinhas/km²) e da Capetinga (0,334 ravinhas/km²). Contudo, são também encontrados trechos de alta fragilidade nestas bacias, associados às altas densidades de vias de circulação, sendo locais potencialmente vulneráveis ao desencadeamento futuro dos processos erosivos. Ressalta-se que estas mostram valores de densidade de ravinhas inferiores à média do parque (0,644 ravinhas/km²).

As maiores porções de áreas frágeis não estão ainda regularizadas. Bacias situadas no centro do Chapadão da Babilônia apresentam locais não regularizados e com alta fragilidade; nestes, há agropecuária, acesso livre para automóveis, atividades off road em veículos 4x4 e grande frequência de queimadas. Por outro lado, em áreas de média e baixa fragilidade, a sudoeste, em razão do baixo índice de regularização, desenvolvem-se aí inúmeras atividades conflitantes, tais como agropecuária, mineração, turismo pouco estruturado, acesso livre e queimadas (MMA; IBAMA, 2005).

4. CONCLUSÕES

Embora tenham se passado mais de 40 anos desde sua criação, o PNSC apresenta hoje inúmeros conflitos que se configuram como ameaças ao equilíbrio deste importante geossistema do cerrado brasileiro. A evolução dos processos erosivos no parque está associada à combinação destes conflitos com as características naturais.

Em todo o PNSC foram identificados 1.275 processos de ravinamentos. Constatou-se neste estudo que a principal variável geoambiental responsável pela gênese e evolução destes processos é a densidade de lineamentos estruturais. Além dos lineamentos, confirmou-se também a importância da vegetação, já que os ravinamentos ocorrem predominantemente em áreas com cobertura vegetal de menor biomassa, ou em áreas com

solo continuamente exposto. Outrossim, estes processos ocorrem, de maneira geral, em altos declives, onde a energia cinética do escoamento da chuva aumenta o poder erosivo. Os processos ocorrem, na maioria, em locais de baixas densidades de vias de circulação; no entanto, como as altas densidades geralmente estão em zonas não regularizadas, são, por isto, potencialmente vulneráveis.

Verificou-se que a metodologia aplicada mostrou-se satisfatória para o mapeamento da fragilidade à ocorrência de ravinhas no PNSC. As áreas mais frágeis foram identificadas em sub-bacias localizadas nas regiões noroeste e central do Chapadão da Babilônia. As menores fragilidades são mais frequentes no Chapadão da Canastra e em certos pontos do Chapadão da Babilônia, especialmente a sudeste. Constatou-se que há relação entre o grau de fragilidade e a densidade de ravinhas nas sub-bacias.

A aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov possibilitou a atribuição de pesos às diferentes variáveis geoambientais. Além disso, a utilização da lógica fuzzy permitiu a obtenção de mapas com maior detalhe e precisão, cuja legenda tenta manter a maior fidelidade possível com o espaço real.

Os mapas gerados podem servir de apoio a ações de planejamento em outras unidades de conservação, por apresentarem informações relevantes, no que se refere aos aspectos físicos e, acima de tudo, por distinguirem diferentes graus de fragilidade à ocorrência de ravinhas. Acredita-se que seja imprescindível o estudo da fragilidade de outros ambientes, para que se possa usufruir de suas potencialidades, utilizando os recursos naturais de modo racional e garantindo a abundância destes bens para as futuras gerações.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Profa. Dra. Marta Felícia Marujo Ferreira, geomorfóloga e docente da UNIFAL-MG, pelo auxílio durante os trabalhos de campo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

- BIGARELLA, João José, BECKER, Rosemari D., SANTOS, Gilberto F. dos. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Vol. 3. Contribuição de Maria Lúcia de Paula Herrmann... [et al.]. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007.
- BISSONNAIS, Y. L.; MONTIER, C. JAMAGNE, M. DAROUSSIN, J. KING, D. **Mapping erosion risk for cultivated soil in France**. *Catena*, v. 46, p. 207-220, 2001.
- BRASIL. Decreto nº 70.355, de 3 de abril de 1972. Cria o Parque Nacional da Serra da Canastra, no Estado de Minas Gerais, com os limites que especifica, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, de 4 de abril de 1972.
- CETEC; FEAM. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Disponível em: <http://www.feam.br/noticias/1/1355-mapa-de-solos>. Acesso em: 28 nov. 2016.
- CHAVEZ Jr., P. S. **Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.55, p.1285-1294, 1989.
- COUTO JUNIOR, A. F.; SOUZA, V. V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; SANTANA, O. A.; FREITAS, L. F.; GOMES, R. A. T. **Integração de parâmetros morfométricos e imagem ASTER para a delimitação das fitofisionomias da Serra da Canastra, Parque Nacional da Serra da Canastra – MG**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 11, n. 1, p. 57-68, 2010.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; FILHO, P.H.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- ESRI. **ArcGIS Desktop 10.1 Help**, 2013. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/>>. Acesso em: 26 de agosto de 2015.
- FENG, X.; WANG, Y.; CHEN, L.; FU, B.; BAI, G. **Modelling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau**. *Geomorphology*, v. 118, p. 239-248, 2010.
- FERREIRA, M. C.; GARÓFALO, D. F. T.; MESSIAS, C.G.; FERREIRA, M. F. M. Um modelo espacial baseado em método de classificação Fuzzy, aplicado ao mapeamento de risco à erosão. In.: **Multidimensão e territórios de risco**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2014. Pág. 95-100.
- FITZ, P. R. **Cartografia básica**. São Paulo: oficina de textos, 2008.
- GARÓFALO, D. F. T.; FERREIRA, M. C. **Mapeamento da fragilidade ambiental por meio de análise geoespacial: uma aplicação na alta bacia dos rios Piracicaba e Sapucaí-Mirim, APA Fernão Dias, MG**. *Revista do departamento de Geografia*, v. 29, p. 212-245, 2015.
- GOOGLE. **Google Earth Pro**. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/download/gep/agree.html>. Acesso em: 09 dez. 2016.
- IBDF; FBCN. **Plano de manejo: Parque Nacional da Serra da Canastra**. Brasília: IBDF, 1981.
- ICMBio. **Mapa com os limites do PNSC** (vetorial). Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas-brasileiros/cerrado/unidades-de-conservacao-cerrado/2090>>. Acesso em: 28 nov. 2016.
- JANSSON, M. B. **Land erosion by water in different climates. Borgstrom Tryckeri. Motala**: Uppsala University, 1982.
- JORGE, M. C. O.; GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes In.: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. (Orgs). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. p. 7-30.
- LOURENÇO, L. **Risco de erosão após incêndios florestais**. Coimbra, FLUC, 2004.
- MEIJERINK, A. M. J. **Remote Sensing: applications to groundwater**. Paris: UNESCO, 2007.
- MMA; IBAMA. **Plano de Manejo: Parque Nacional da Serra da Canastra**. Brasília: MMA, 2005.
- MORGAN, R.P.C. **Soil Erosion and Conservation**. Hong Kong: Longman Group UK Limited, 1986.
- OCHOA-CUEVA, P.; FRIES, A.; MONTESINOS, P.; RODRÍGUEZ-DÍAS, J.; BOLL, J. **Spatial estimation of soil erosion risk by land cover change in the Andes of Southern Ecuador**. *Land degradation & development*, v. 26, p. 565-573, 2013.
- OKEREKE, C. N.; ONU, N. N.; AKAOLISA, C. Z.; IKORO, D. O.; IBENEME, S. I.; UBECHU, B.;

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA FUZZY PARA O MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE DO TERRENO EM RELAÇÃO À OCORRÊNCIA DE RAVINAS NO PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA

- CHINEMELU, E. S.; AMADIKWA, L. O. **Mapping Gully Erosion Using Remote Sensing Technique: A Case Study Of Okigwe Area, Southeastern Nigeria.** International Journal of Engineering Research and Applications, v. 2, n. 3, p. 1955-1967, 2012.
- PRASANNAKUMAR, V.; VIJITH, H.; ABINOD, S.; GEETHA, N. **Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology.** Geoscience Frontiers, v. 3, n. 2, p. 209-2015, 2012.
- ROSS, J.L.S. **Relevo Brasileiro: Uma nova proposta de classificação.** Revista do Departamento e Geografia, n. 4, p. 25-39, 1985.
- ROSS, J. L. S. **Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados.** Revista do Departamento de Geografia, n.8, p. 63-74, 1994.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.** In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3, 1973, Washington: NASA, 1974, v.1, p.309-317.
- SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção de processos erosivos.** In.: GUERRA, C.J.T.; SILVA, A.S da; BOTELHO, R.G.M. (Orgs). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1999.
- SANTORO, J. **Erosão continental.** In.: TOMINAGA, L.K; SANTORO, J.; AMARAL, R. Do (Orgs). **Distúrbios Naturais: conhecer e prevenir.** 2ª ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2012.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E. ; CAMARGO, P. B.. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas.** São Carlos: RiMa, 2004.
- SOARES, P. C.; FIORI, A. P.. **Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia.** Boletim Geográfico, v. 36, p. 258-259, 1978.
- SOUZA, L. H. F. **Representação gráfica de feições lineares do relevo: proposta de aplicação de simbologia linear digital na cartografia geomorfológica** (Dissertação de mestrado). Uberlândia: UFU, 2006.
- STRAHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology.** Transactions of American Geophysical Union, v.38, p. 913-920, 1957.
- TAYLOR, P. J. **Inferential statistic.** TAYLOR, P. J. Quantitative methods in geography. Boston: Houghton Mifflin Co., 1977. P. 102-123
- TRABUCCHI, M.; PUENTE, C.; COMIN, F. A.; OLAGUE, G.; SMITH, S. V. **Mapping erosion risk at the basin scale in a Mediterranean environment with opencast coal mines to target restoration actions.** Regional Environmental Change, v. 12, n. 4, p. 675-687, 2012.
- USGS. **Earth explorer.** Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. 09 dez. 2016.
- TRICART, Jean. **Ecodinâmica.** Rio De Janeiro: IBGE, 1977
- VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. **Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.
- YOUNG, I. T. **Proof without prejudice: use of the kolmogorov-smirnov test for the analysis of histograms from flow systems and other.** The Journal of Histochemistry and Cytochemistry, v. 25, n. 7, p. 935-941, 1977.
- WANG, F., HALL, G. B.; SUBARYONO. **Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software: database design and application.** International Journal of Geographical Information Systems, v 4, n. 3, 261-283, 1990.
- WANG, L.;HUANG, J.; DU, Y.; HU, Y.; HAN, P. **Dynamic Assessment of Soil Erosion Risk Using Landsat TM and HJ Satellite Data in Danjiangkou Reservoir Area, China.** Remote Sensing, v. 5, n. 8, p. 3826-3848, 2013.
- XU, L.; XU, X.; MENG, X. **Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China.** Catena, v. 100, p. 74-82, 2012.
- ZACHAR, D. **Soil erosion.** Bratislava: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.