

ANÁLISE MORFOMÉTRICA E MULTICRITERIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTA BÁRBARA, NORDESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)

*Morphometric and Multicriterial Analysis of the Santa Bárbara River Basin,
Quadrilatero Ferrifero Northeast (MG)*

Sandra Cristina Deodoro & Bráulio Magalhães Fonseca

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências / Departamento de Cartografia
Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte – MG - Brasil
sdeodoro@hotmail.com, brauliomagalhaes@cart.igc.ufmg.br

Recebido em 25 de Julho, 2016/ Aceito em 12 de Outubro, 2016
Received on July 25, 2016/ Accepted on October 12, 2016

RESUMO

Este trabalho apresenta uma caracterização do potencial erosivo da sub-bacia do rio Santa Bárbara (MG), integrante da bacia do rio Doce, com auxílio de ferramentas de Geoprocessamento e de Sensoriamento Remoto aplicadas em análise geomorfológica. Para tanto, baseou-se nos aspectos geológicos, pedológicos, de declividade e de uso e cobertura do solo daquela sub-bacia sobre as quais se aplicou a álgebra de mapas para análise multicriterial. Alguns parâmetros geomorfométricos (Índices de Hack-IH e de Concentração da Rugosidade do Relevo-ICR) foram utilizados de forma complementar, sobre os quais foram aplicados alguns procedimentos geoestatísticos. Para o mapeamento do uso e da cobertura do solo utilizou-se a imagem LANDSAT-8 654RGB e realizou-se classificação pelo método Max-Ver, obtendo um desempenho médio geral das amostras de 95,10%. Para a espacialização do Índice de Hack aplicou-se o interpolador IDW e, para o Índice de Concentração da Rugosidade do Relevo, o estimador de densidade de Kernel. Os resultados mostraram que (i) parte da porção centro-norte da bacia do rio Santa Bárbara apresenta os menores valores de declividade, de IH, de ICR e de potencialidade a erosão; (ii) a bacia do rio Santa Bárbara apresenta vigor energético alto a muito alto na maior parte de sua área; (iii) consistem com a realidade física e antrópica da bacia por conhecimento prévio da área de estudo. Desta forma, pode-se considerar que, a partir de conhecimentos prévios da área de estudo, as análises morfométrica e multicriterial, apoiadas em procedimentos geoestatísticos e SIG, constituem em ferramentas eficazes nos trabalhos de planejamento e gestão territorial, principalmente se aplicadas de forma inter-relacionada.

Palavras chaves: Parâmetros Morfométricos, Análise Multicriterial, Geoestatística, Potencialidade a Erosão.

ABSTRACT

This work presents erosive potential of the Santa Bárbara river basin (MG), located in Doce river basin, through Geoprocessing and Remote Sensing applied in geomorphological analysis. For this purpose, aspects like geology, soil types, slope and land use cover were used. The erosive potencial map was made through multicriterial analysis. Some indexes of geomorphometric analysis (Stream Length-Gradient Index or Hack Index-HI and Concentration Index Roughness-CIR) were used complementarily. LANDSAT-8 image and the classification images method named Maximum Likelihood were used for the land use cover map. The average performance of this method was 95,10%. The IDW interpolation was applied in order to elaborate the Hack Index Map; the kernel density estimator was applied to elaborate the Concentration Index Roughness Map. The results obtained were (i) part of the north-central portion

of the river Santa Barbara Basin has the lowest values of slope, HI, CIR and potential erosion; (ii) river basin Santa Barbara presents energy high to very high in most of its area; (iii) the results were consistent if compared them at the natural and anthropic aspects of this basin. Thus, it can be considered that previous knowledge of the study area, the morphometric and multi-criteria analysis supported by geostatistical and GIS procedures, constitute effective tools in the work of planning and land management in interrelated way.

Keywords: Morphometric Parameters, Multicriteria Analysis, Geostatistical, Potential Erosion.

1. INTRODUÇÃO

A análise morfométrica de bacias hidrográficas é um importante recurso para caracterizar e identificar a dinâmica de um sistema fluvial, pois os cursos de água constituem elemento morfogenético dos mais ativos na esculturação da paisagem terrestre (CHRISTOFOLETTI, 1980). Ainda de acordo com este autor, a análise de bacias hidrográficas apresentou caráter mais objetivo (abordagem quantitativa das bacias de drenagem) a partir do trabalho desenvolvido por Horton, em 1945, que procurou estabelecer as leis do desenvolvimento dos rios e de suas bacias (CHRISTOFOLETTI, 1980). Os índices e parâmetros sugeridos para tal análise estão agrupados em quatro temáticas: hierarquia fluvial, análise areal, análise linear e análise hipsométrica.

Neste trabalho, são utilizados os Índices de Hack (IH) e de Concentração de Rugosidade (ICR). O primeiro trata da relação entre a declividade e a extensão do canal fluvial, proposto por Hack em 1957 e 1973, em perfis longitudinais de rios, denominada de *Stream Length-Gradient Index* (SL Index). O segundo, proposto por Sampaio (2008) e por Sampaio e Augustin (2014), utiliza a geoestatística para avaliar espacialmente as informações de declividade, através da conversão desta em uma malha de pontos ou através dos valores da rugosidade, aplicando-se, posteriormente, o estimador de densidade de Kernel.

A análise geomorfológica de bacia hidrográfica, com ênfase nos parâmetros morfométricos, em ambiente SIG é muito utilizada devido à agilidade dos cálculos e à combinação das variáveis, proporcionados pelas técnicas de geoprocessamento, com destaque para a interpolação geoestatística e a análise espacial de multicritérios. Diversos exemplos podem ser verificados em Veneziani (1987); Centeno (2003); Etchebehere, *et al.* (2004); Carvalho e Latrubesse, (2004); Sampaio e Augustin (2008);

Fonseca (2010); Fonseca e Augustin (2011); Souza e Sampaio (2010); Cherem (2008); Santos e Moraes (2012); Rodrigues *et al.* (2011); Costa *et al.* (2011); Freire *et al.* (2013) e Altaf *et al.* (2014).

As finalidades destas aplicações são várias com destaque para compartimentação do relevo, subsídios a estudos de paisagem, suscetibilidade e potencialidade a erosão e suscetibilidade a inundação.

O uso de técnicas de sensoriamento remoto e SIG para a caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas também tem sido amplamente utilizados, com destaque para os trabalhos de Walsh *et al.* (1998), Bocco *et al.* (2001), Jain *et al.* (2002), Reddy *et al.* (2004), Vittala *et al.* (2004), Arun *et al.* (2005), Mahajan *et al.* (2005), Solanke *et al.* (2005), Fonseca (2010) e Bagyaraj *et al.* (2011).

A associação de análises morfométricas ou geomorfométricas de bacias hidrográficas com análises multicriteriais permite a avaliação integrada de importantes fatores que podem explicar a dinâmica da paisagem. Neste sentido, Altaf *et al.* (2014) utilizaram um conjunto de parâmetros morfométricos e tipologias de uso e cobertura da terra como variáveis de entrada num modelo de análise multicriterial em ambiente SIG para avaliar a suscetibilidade à erosão em microbacias no Himalaia. Rawat *et al.* (2010) associaram técnicas geomorfométricas para caracterização do relevo visando a quantificação de processos biofísicos e a análise da aptidão do uso da terra. Estes autores definiram unidades planejamento com distintas áreas de aptidões de uso da terra, tendo como base metodológica a análise multicriterial para combinar parâmetros morfométricos do relevo e da rede de drenagem, variáveis geológicas e tipologias de uso da terra.

Aher *et al.* (2013) realizaram análise morfométrica e multicriterial para identificar bacias hidrográficas com prioridade de conservação e investimento em práticas de desenvolvimento sustentável.

O presente trabalho tem como objetivo realizar análise morfométrica e multicriterial para avaliar a suscetibilidade a processos erosivos na bacia do rio Santa Bárbara, nordeste do Quadrilátero Ferrífero – MG.

Os objetivos específicos são:

- Identificar áreas de maior potencial hidroenergético da bacia;
- Identificar as áreas com maior potencialidade à erosão;

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este item apresenta os procedimentos utilizados na elaboração deste trabalho os quais envolveram fases de tratamento de bases cartográficas, classificação de imagens, geoestatística, cálculo de índices morfométricos e análise multicriterial. Ao final, um fluxograma é apresentado para sintetizar os procedimentos metodológicos.

2.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho é a (sub)bacia do rio Santa Bárbara, afluente do rio Piracicaba, na bacia do alto rio Doce. Os municípios integrantes da bacia são Itabira, Bom Jesus do Amparo, São Gonçalo do Rio Abaixo, João Monlevade, Bela Vista de Minas, Santa Bárbara, Barão de Cocais e Catas Altas.

A Figura 1 apresenta o mapa de localização da área de estudo em relação à bacia do rio Doce e os referidos municípios integrantes da sub-bacia do rio Santa Bárbara. Observe que esta apresenta direção NW-NE na sua bacia principal (rio Doce). A Figura 2 apresenta o mapa de sua rede de drenagem.



Fig. 1 – Mapa de localização da bacia do rio Santa Bárbara.

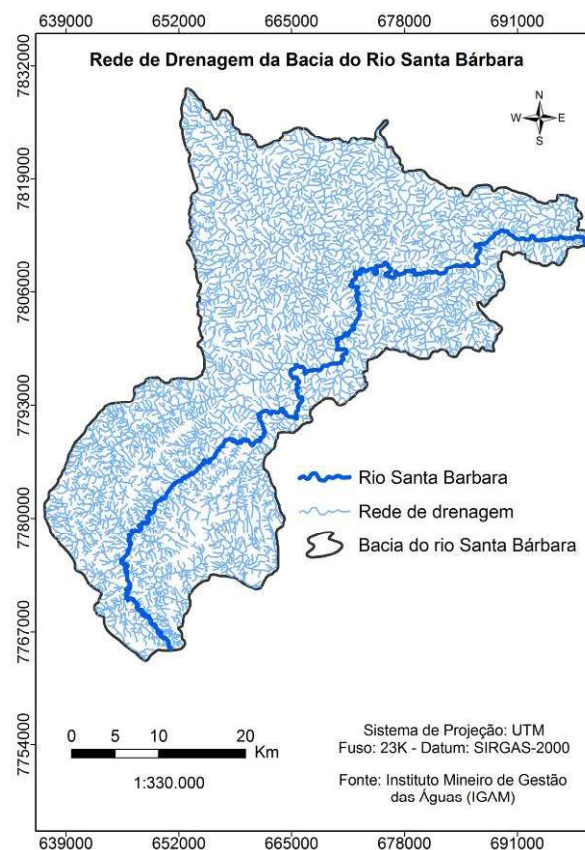


Fig. 2 – Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Santa Bárbara.

A bacia do rio Santa Bárbara possui uma rede de drenagem densa, de padrão predominantemente dendrítico, principalmente na porção centro-norte. De maneira geral, pode-se dizer que ela apresenta duas unidades de paisagens distintas em termos de geologia (litologia e estrutura), pedologia, geomorfologia e uso/ocupação do solo: (i) porção centro-sul, caracterizada pelos quartzitos e afloramentos do maciço da serra do Caraça, por solos jovens (Neossolo Litótico e Cambissolo), relevos colinosos e dissecados e por cobertura de Mata Atlântica, Cerrado e Campos de Altitude, induzindo o uso preservacionista; e (ii) porção centro-norte, com litologias variadas, solos mais evoluídos (Latossolo e Argissolo), com baixa densidade de cobertura vegetal e predomínio de áreas antropizadas, representada por pasto e eucalipto, onde se assentam as manchas urbanas dos municípios e infraestruturas de acesso, indicando o uso predominantemente antrópico.

2.2 Metodologia

De maneira geral, este trabalho divide-se em cinco etapas metodológicas: preparação das

bases cartográficas e mapas de apoio; cálculo dos parâmetros morfométricos; procedimentos geoestatísticos, análise morfométrica e análise de multicritérios. Os materiais e procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho estão descritos a seguir:

2.2.1 Bases cartográficas

Para as drenagens e para a delimitação da bacia do rio Santa Bárbara foram utilizadas as bases cartográficas do IBGE, no formato *shape file*, atualizadas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), escala 1:50.000; para o mapa geológico foram utilizadas as bases cartográficas da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM), referentes à carta geológica do Brasil ao Milionésimo – escala 1:1.000.000 (folhas Belo Horizonte SE23 e Rio de Janeiro SF23); para o mapa de tipos de solo foram utilizadas as bases referentes ao Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, em escala 1:650.000, publicado em 2010 pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Universidade Federal de Lavras (UFLA), pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) e pela Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM); para a elaboração do Modelo Digital de Elevação e do respectivo mapa de declividade, foram utilizadas as curvas de nível do projeto TOPODATA, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

À exceção do mapa de uso e cobertura do solo, cuja escala foi adaptada à resolução espacial de 30m da imagem LandSat 8, os demais mapas produzidos foram adaptados à uma escala de 1:330.000.

2.2.2 Cenas da imagem LANDSAT-8

Duas cenas da imagem LANDSAT-8 da área de estudo, datadas de maio/2013 e agosto/2013, foram utilizadas para a classificação de imagens e para a posterior elaboração do mapa de uso e cobertura do solo (Figura 3).

A Figura 3, anterior, apresenta o aspecto da área de estudo nas duas cenas da imagem LANDSAT, na composição falsa cor 654RGB, com aplicação de contraste no histograma da imagem. A plataforma LANDSAT-8, lançada em fevereiro/2013, opera com dois instrumentos imageadores: *Operational Land Imager (OLI)* e *Thermal Infrared Sensor (TIR)*.

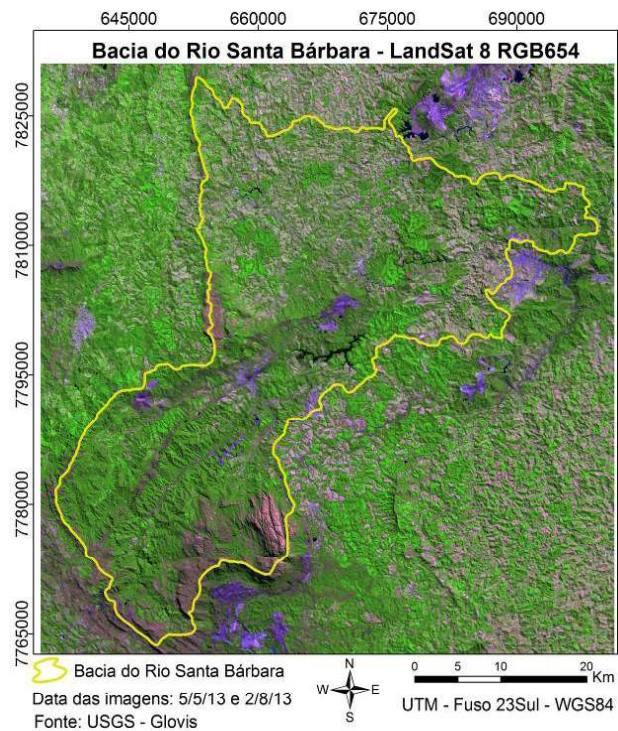


Fig. 3 – Imagem da bacia do rio Santa Bárbara na composição colorida 654RGB-LANDSAT. A porção extremo-sul corresponde à parte da serra do Caraça no contexto da região da Serra do Gandarela; o corpo d'água da porção central corresponde à represa de Peti (CEMIG).

2.2.3 Classificação das cenas da imagem LANDSAT-8, composição colorida 654RGB e posterior elaboração do mapa de uso e cobertura do solo

Utilizou-se o classificador *Máxima Verossimilhança (Max-Ver)*, por pixel, em ambiente do *software SPRING*. Tal classificador considera a ponderação das distâncias entre as médias dos valores dos pixels das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Assume que todas as bandas têm distribuição normal e calcula a probabilidade de um dado pixel pertencer a uma classe específica (INPE, 2008). É um classificador eficiente porque as classes de treinamento são utilizadas para estimar a forma da distribuição dos pixels contidos em cada classe no espaço de n bandas, como também a localização do centro de cada classe (MENESES & ALMEIDA, 2012). Escolheu-se este classificador por este permitir a escolha de regiões homogêneas. Nas amostras de treinamento, o usuário considerou a heterogeneidade da paisagem e o relevo movimentado da área de estudo.

A chave de interpretação utilizada para as

áreas de treinamento é composta das seguintes classes temáticas: água, vegetação arbórea-arbustiva, vegetação herbácea, área urbana, eucalipto, solo exposto, mineração e afloramento rochoso. Estas classes são compatíveis com a estrutura da paisagem da área da bacia do rio Santa Bárbara bem como de toda a região do Quadrilátero Ferrífero. As características dos alvos utilizadas para a coleta das amostras de treinamento (supervisionado) foram tamanho, forma, cor (matiz), tonalidade e textura. Neste procedimento, o usuário deve identificar na imagem uma área representativa de cada classe.

Observaram-se os resultados da classificação através da matriz de confusão ou matriz de erros, um recurso estatístico muito utilizado na avaliação da acurácia dos modelos de classificação de imagens (GONZÁLEZ-ALONSO & CUEVAS, 1993; CONGALTON & GREEN, 1993; LEWIS & BROWN, 2001; FOODY, 2002; LU & WENG, 2007).

A matriz de confusão apresenta a distribuição de porcentagem de pixels classificados correta e erroneamente. Uma matriz de classificação ideal deve apresentar os valores da diagonal principal próximos a 100%, indicando que não houve confusão entre as classes (GONZÁLEZ-ALONSO & CUEVAS, 1993; CONGALTON & GREEN, 1993). A matriz resultante da classificação obtida no presente trabalho está apresentada no item “Resultados e Análises”.

2.2.4 Escolha e cálculo dos parâmetros morfométricos

Os parâmetros utilizados relacionam-se ao relevo e à rede de drenagem, e servem de base para as análises linear, areal (ou zonal) e hipsométrica da bacia. A escolha dos fatores levou em consideração a possibilidade de relacionar o vigor energético da bacia e a rugosidade do relevo. Desta forma, os parâmetros trabalhados são o Índice de Hack (IH) e o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR).

O Índice de Hack trata da relação entre a declividade e a extensão do canal fluvial, proposto por Hack em 1957 e 1973, em perfis longitudinais de rios (*Stream Length-Gradient Index* ou SL Index). A Figura 4 mostra a representação esquemática do cálculo do Índice de Hack.

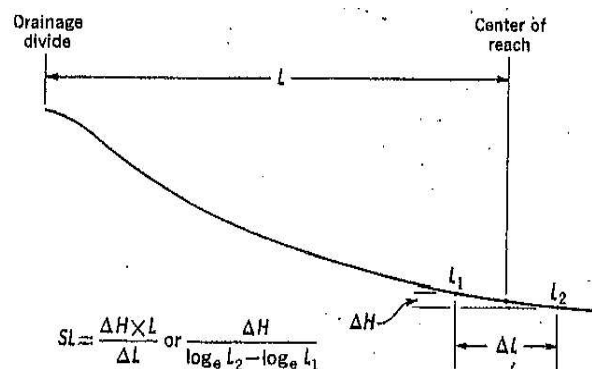


Fig. 4 – Representação esquemática do cálculo do IH. Fonte: Hack (1973).

No Brasil este índice é também conhecido como Relação Declividade-Extensão (RDE) e consiste na seguinte equação (ETCHEBEHERE *et al.*, 2004):

$$SL = (h/l) * L \quad (1)$$

onde:

SL = índice Stream-Lenght

h = diferença entre a altura máxima e a mínima do trecho do canal estudado

l = a projeção horizontal do trecho a ser estudado

L = comprimento do ponto mais a jusante do trecho estudado à cabeceira da bacia em linha reta.

Hack (1973) observou que o resultado relaciona-se diretamente à competência de um rio e que, por sua vez, à energia do mesmo.

O ICR utiliza um interpolador geoestatístico para avaliar espacialmente as informações de declividade. De acordo com Souza e Sampaio (2010), este índice “utiliza-se dos valores indiretos da rugosidade, a partir da análise da repetição dos valores de declividade por unidade de área”. Desta forma, pode ser obtido através da conversão da matriz de declividade em uma malha de pontos ou através dos valores da rugosidade e analisado posteriormente pelo estimador de densidade de Kernel.

O estimador de densidade de Kernel – uma ferramenta geoestatística – é utilizado para a análise espacial do ICR, pois permite verificar a dispersão ou concentração de um fenômeno espacial por meio de um raio de abrangência. “O papel do Kernel é interpolar um valor de intensidade para cada amostra em uma área,

considerando uma função simétrica, centrada nas amostras, utilizando para o cálculo os pontos situados até certa distância do centro da amostra” (MESSIAS & TROVÓ, 2013).

Os resultados da espacialização dos Índices de Hack e de Concentração da Rugosidade foram utilizados para complementar as análises dos mapas de uso e cobertura do solo e de potencialidade erosiva.

2.2.5 Tratamentos geoestatísticos

A interpolação é uma técnica utilizada para a estimativa do valor de um atributo em locais não amostrados, a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. Baseia-se no raciocínio de que, em média, os valores do atributo tendem a ser similares em locais mais próximos do que em locais mais afastados (JAKOB & YOUNG, 2006).

Os métodos de interpolação mais comuns dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em geral pertencem a duas categorias: globais e locais, sendo os globais mais utilizados em superfícies de tendência e, os locais, podem ser polinômios de baixa ordem, funções spline, poliedros, triangulação e médias móveis ponderadas. Os métodos Ponderação do Inverso das Distâncias (IDW), Polinomial Global, Polinomial Local, Funções de Base Radial, Krigagem, Co-Krigagem, calculam um valor de uma dada grandeza no espaço entre as amostras ou observações a partir de uma combinação linear dos valores observados (JAKOB & YOUNG, 2006).

O interpolador IDW emprega o modelo estatístico denominado “Inverso das Distâncias”. O modelo consiste em se multiplicar os valores das amostras pelo inverso das suas respectivas distâncias ao ponto de referência para a interpolação dos valores. Este interpolador foi usado neste trabalho para gerar uma superfície contínua com os dados pontuais do índice SL (ou Índice de Hack) e, posteriormente, identificar as zonas drenadas por cursos de água com o mesmo vigor energético e identificar os pontos de energia da bacia do rio Santa Bárbara.

A equação 2 apresenta o cálculo do IDW, onde z corresponde aos valores estimados, n representa o número de amostras, z_i os valores conhecidos e d_i representa as distâncias entre os valores conhecidos e estimados (z_i e z).

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (2)$$

Para o cálculo do IDW no *software ArcGIS*, aplicou-se um raio de busca de 2000m e fator P (force) igual a 2; para o estimador de densidade de Kernel, o raio de busca foi equivalente ao do IDW, de 2.200m. Para ambos, escolheu-se o tamanho da célula de 30m em correspondência com a resolução espacial das cenas das imagem LANDSAT e com os dados do TOPODATA-SRTM.

Utilizou-se o estimador de densidade de Kernel a partir dos valores (pontos) de declividade, obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação, para obter o ICR.

2.2.6 Análise de Multicritério

A Análise de Multicritérios é um procedimento metodológico utilizado em análises espaciais que consiste no cruzamento de variáveis, também conhecida como Árvore de Decisões ou como Análise Hierárquica de Pesos. De acordo com Moura (2007), o procedimento baseia-se no mapeamento de variáveis por plano de informação e na definição do grau de pertinência de cada plano de informação e de cada um de seus componentes de legenda para a construção do resultado final. O cálculo empregado é a simples Média Ponderada, mas há pesquisadores que já utilizam a lógica Fuzzy para atribuir os pesos e notas.

A álgebra de mapas é o procedimento de combinação de variáveis que apoia a análise de multicritérios. Como o próprio nome diz, são operações matemáticas utilizando-se mapas, dados rasters, conforme variáveis consideradas, que produzem novos resultados para análise e síntese da informação.

A atribuição de pesos para a elaboração do mapa de suscetibilidade erosiva, esta baseada no trabalho de Faria *et al.* (2003) que realizou análise das áreas com suscetibilidade à erosão do solo na bacia do ribeirão do Espírito Santo, em Juiz de Fora, Minas Gerais. A Tabela 1 apresenta a contribuição (%) de cada tema (Geologia, Pedologia, Declividade e Uso e Cobertura do Solo).

Tabela 1: Ponderação (%) de cada tema das variáveis

Tema	Peso (%)
Pedologia	20
Declividade	20
Geologia (Litotipos)	25
Uso e cobertura do solo	35

Fonte: Faria *et al.* (2003). Adaptado.

A atribuição das notas das variáveis (ou atributos) de cada tema está baseada nos trabalhos de (i) Parizzi *et al.* (2010), referente ao mapeamento das unidades geotécnicas da Região Metropolitana de Belo Horizonte, no âmbito do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte; (ii) Crepani *et al.* (2001) que apresenta uma metodologia para elaborar mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo com o objetivo de subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia; (iii) Gonçalves *et al.* (2011) que adaptou a proposta metodológica de Ross (1994) para novos

procedimentos de determinação da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas, com apoio de Sistema de Informação Geográfica.

As Tabelas 2 a 5 apresentam as notas das variáveis de cada tema (Pedologia, a Geologia, a Declividade e ao Uso e Cobertura do Solo), sendo que os maiores valores indicam menor contribuição à instabilidade do relevo e à potencialidade à erosão. Eventualmente foram feitas algumas adaptações nas notas para adequar à realidade da área estudada.

Tabela 2: Notas das variáveis relacionadas ao tipo de solo

	Atributo	Nota
Pedologia	Cambissolo háplico	1
	Argissolo vermelho-amarelo	6
	Neossolo litólico	7
	Afloramento rochoso	8
	Latossolo vermelho	9
	Latossolo vermelho-amarelo	9

Fonte: Crepani *et al.* (2001). Adaptado

Tabela 3: Notas das variáveis relacionadas à geologia

Tema	Atributo (unidades geotécnicas)	Nota
Geologia	Grupo 8: Areia, Cascalho, Aglomerado, Argila, Laterita, Arenito, Conglomerado, Diamictito, Lamito, Arenito Conglomerático	2
	Grupo 5: Dolomito, Itabirito Dolomítico, Filito	4
	Grupo 10: Calcário, Metapelito	4
	Grupo 4: Xisto, Metagrauvaca, Metamáfica, Metagabro, Serpentinó, Xisto, Filito, Filito, Ferruginoso, Dolomito, Quartzito, Metapelito, Formação Ferrífera Bandada, Metabasalto Komatítico, Metachert, Metagabro	5
	Grupo 2: Argilito, Quartzito	5,5
	Grupo 9: Metarenito, Metagrauvaca, Metapelito, Arenito, Laterita, Pelito	6
	Grupo 3: Itabirito, Dolomito, Granito, Sienogranito	7
	Grupo 6: Quartzito, Metaconglomerado, Quartzo-mica xisto, Arenito, Metaconglomerado	7
	Grupo 7: Soleiras, Diques máficos, Metabasalto, Komatiito	7
	Grupo 1: Gnaisse, Granito, Anfibolito, Granitóide, Tonalito, Enderbitó, Norito, Quartzito, Ortognaisse, Biotita, Granodiorito	8

Fonte: Parizzi *et al.* (2010).

Tabela 4: Notas das variáveis relacionadas à declividade

Tema	Atributo (graus de declividade)	Nota
Declividade	> 45	2
	30 – 45	3
	10 – 30	5
	5 – 10	7
	0 – 5	9

Tabela 5: Notas das variáveis relacionadas ao uso e cobertura do solo

Tema	Atributo	Nota
Uso e cobertura do solo	Solo exposto	1
	Mineração	1
	Vegetação rasteira/pastagem	3
	Silvicultura (eucalipto)	7
	Urbano	7
	Afloramento rochoso	8
	Vegetação arbóreo-arbustiva	9
	Corpos d'água	10

2.2.7 Elaboração dos mapas de Potencialidade a Erosão e de Espacialização dos Índices de Hack e de Concentração da Rugosidade do Relevo da bacia do rio Santa Bárbara

A Figura 5 apresenta, graficamente, um resumo dos procedimentos metodológicos no SIG:

Fonte: Gonçalves *et al.* (2011). Adaptado.

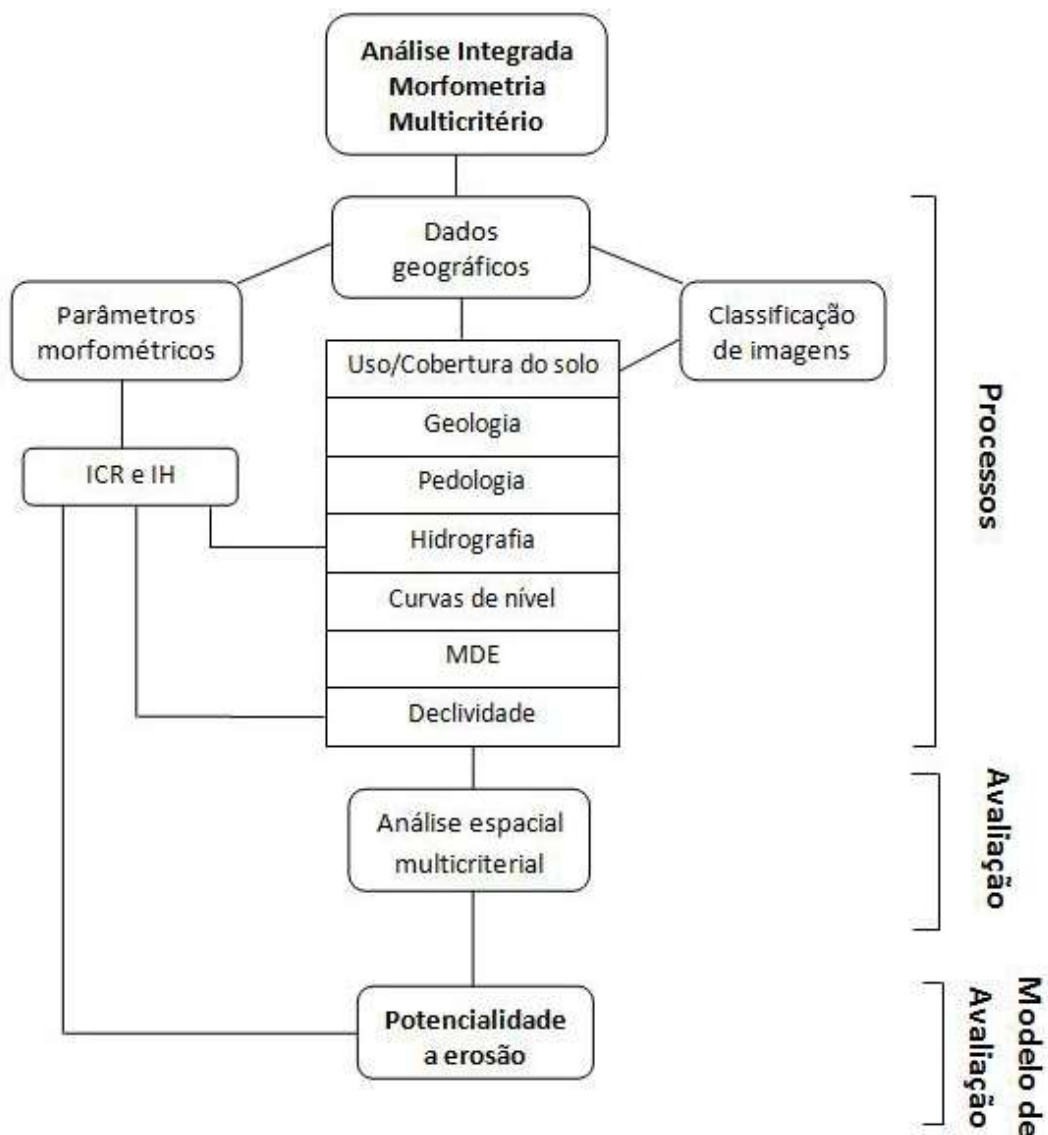


Fig. 5 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste item são apresentados os resultados da classificação supervisionada das cenas das imagens LandSat 8, dos cálculos dos parâmetros morfométricos (Índices de Hack e de Concentração da Rugosidade do Relevo) e o mapeamento da suscetibilidade erosiva da área de estudo.

Análises integradas destes resultados foram realizadas através da análise multicriterial

sobre o comportamento da suscetibilidade erosiva da bacia do rio Santa Bárbara.

3.1 Classificação supervisionada – Mapa de uso e cobertura do solo

A Figura 6 apresenta o resultado da classificação automática supervisionada baseada em pixel, utilizando-se o algoritmo Max-Ver, com identificação de oito classes de uso e cobertura do solo e fotografias representativas da paisagem de algumas áreas da bacia.

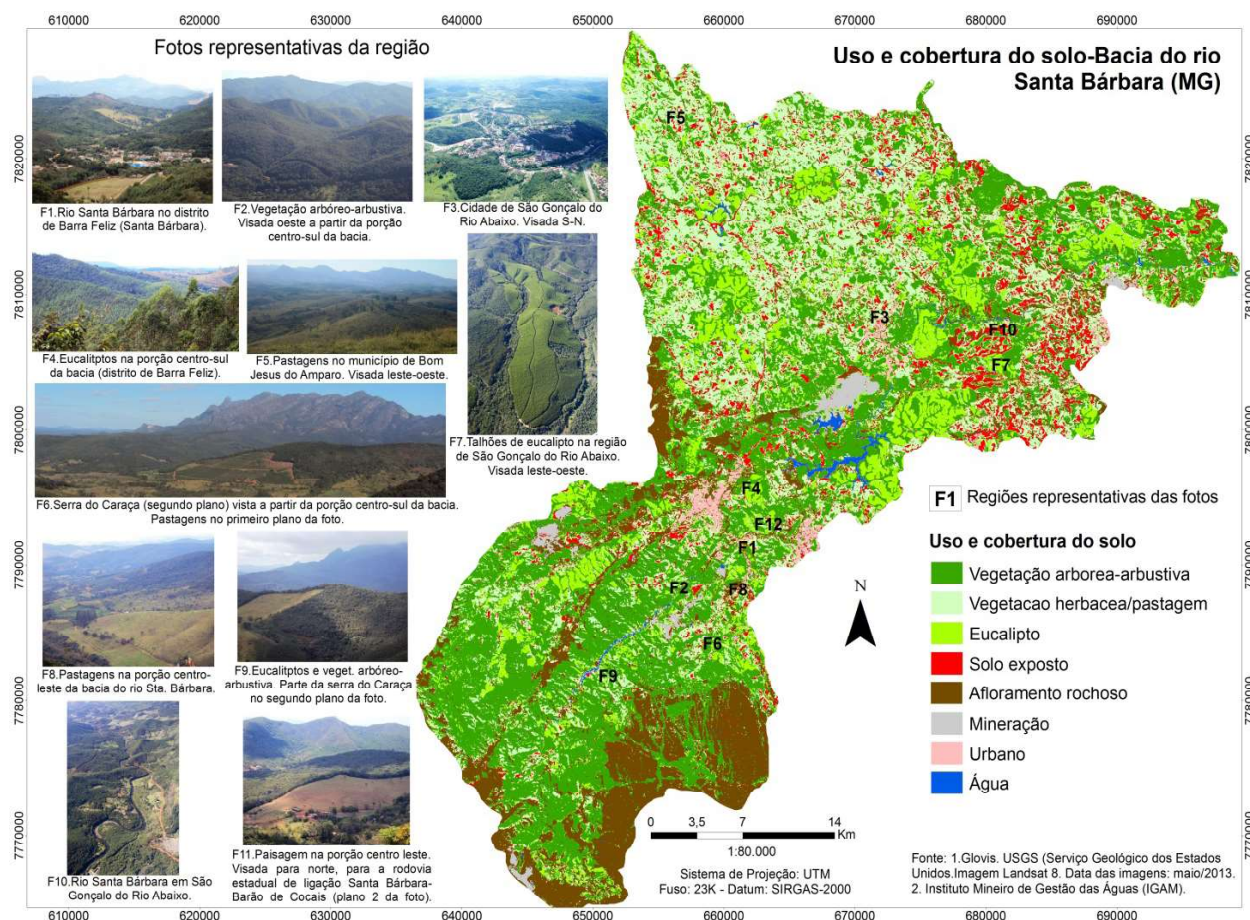


Fig. 6 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo da bacia do rio Santa Bárbara.

O resultado da classificação foi satisfatório, uma vez que correspondeu à realidade de campo e aos parâmetros estatísticos da matriz de confusão. O desempenho médio da classificação foi de 95,10% (Tabelas 6 e 7) ao limiar de aceitação de 100%. Para reduzir a confusão entre áreas urbanas, mineração, solo exposto e afloramento rochoso, principalmente, procedeu-se à edição vetorial atingindo resultado consistente com a área de estudo.

Tabela 6: Resumo da matriz de confusão

Fator	Resultado
Desempenho geral	95.10 %
Confusão média	4.90 %
Abstenção média	0.00 %
Estística KHAT	93.85 %
Variância KHAT	4.073e-006
Estística TAU	94.40 %

Fonte: Matriz de confusão obtida no *software SPRING*.

Tabela 7: Detalhamento do desempenho da classificação

Classe	Exatidão do produtor	Exatidão do usuário
Água	99.94%	100.00%
Afloramento rochoso	95.56%	95.44%
Eucalipto	96.96%	97.85%
Solo exposto	89.69%	89.11%
Vegetação arbórea	99.11%	98.40%
Vegetação herbácea	88.24%	100.00%
Urbano	74.79%	91.80%
Mineração	94.68%	90.32%

Fonte: Matriz de confusão obtida no *software SPRING*.

A imagem Landsat e o classificador utilizado foram suficientes para representar as características do uso e cobertura do solo da bacia do rio Santa Bárbara. Ressalta-se o resultado da matriz de confusão da classificação com desempenho médio geral das amostras de 95,10%.

As características da imagem (espectrais, espaciais e radiométricas), entretanto, atenderam o objetivo proposto deste trabalho baseado em análise regional – considerando-se as dimensões da bacia (área de 1.597km² e perímetro de 262Km) e a escala de análise – de caracterizar os principais elementos quanto ao uso e cobertura do solo:

3.2 Espacialização do Índice de Hack

O cálculo do Índice de Hack resultou em valores (índices) que variaram entre 0,00201 (menor valor) e 130,161 (maior valor), indicando diferenças hidroenergéticas em diversos trechos da bacia, bem como anomalias nos canais de drenagem. Hack (1973) observou em seus estudos que valores elevados do índice relacionam-se diretamente à competência e à energia dos rios. A interpolação dos valores pontuais do índice de Hack resultou em uma superfície com variação contínua no espaço. Este procedimento geostatístico permitiu espacializar os valores para toda a bacia, de forma otimizada, facilitando a análise.

A espacialização deste índice evidenciou, de um modo geral, a baixa energia dos canais de drenagem de ordens superiores, tais como os rios Santa Bárbara e Una. É importante ressaltar que mesmo os rios de ordem fluvial superior

apresentaram trecho com energia acima da média geral do canal, a exemplo dos trechos com *knickpoint* nas adjacências dos barramentos da represa de Peti, da represa da PCH São Gonçalo e da barragem de rejeitos da Mina de Brucutu.

A correspondência de valores elevados do índice com a localização dos reservatórios de Peti (CEMIG) e da PCH São Gonçalo evidenciam o potencial hidroenergético da bacia do rio Santa Bárbara.

Observa-se uma relação estreita entre a ocorrência espacial de elevados valores do Índice de Hack, em zonas de elevada energia dos canais de drenagem e a densa cobertura de vegetação de porte arbóreo, através das Figuras 6 e 7, especialmente nos canais principais (rios Santa Bárbara, Uma, Conceição e Barão de Cocais, além do ribeirão Caraça). Tal relação pode ser observada na porção sul da área de estudo, onde os canais altamente energéticos escavam vales encaixados, resultando em uma zona de difícil avanço das atividades antrópicas, a exemplo das áreas de pastagem e urbanização.

A Figura 7 apresenta o resultado do Índice de Hack com a interpolação pelo IDW.

3.3 Espacialização do Índice de Concentração de Rugosidade do Relevo

O resultado obtido mostra que as porções centro-sul e extremidade nordeste da bacia apresentam os maiores valores do ICR (alto e muito alto) indicando que são as áreas de relevo mais dissecado da bacia. Tais porções correspondem às áreas onde concentram as unidades de conservação, as maiores declividades, os afloramentos rochosos, os solos litólicos e aquelas de muito baixa a média potencialidade a erosão, relacionadas de certa forma, ao uso destinado a preservação ambiental.

As menores concentrações de rugosidade do relevo (baixa e muito baixa) ocorrem na porção norte da bacia, relacionada às áreas de ocorrência de granitos gnaises e um relevo caracterizado por colinas suaves com topos rebaixados, com predomínio das menores declividades (0° a 10°) e do uso do solo representado por pastagens. É possível perceber que os sítios urbanos dos municípios de Barão de Cocais e São Gonçalo do Rio Abaixo foram representados por duas zonas de baixos valores de ICR e de IH.

A Figura 8 apresenta o Mapa do Índice de Concentração de Rugosidade do Relevo com representação em classes.

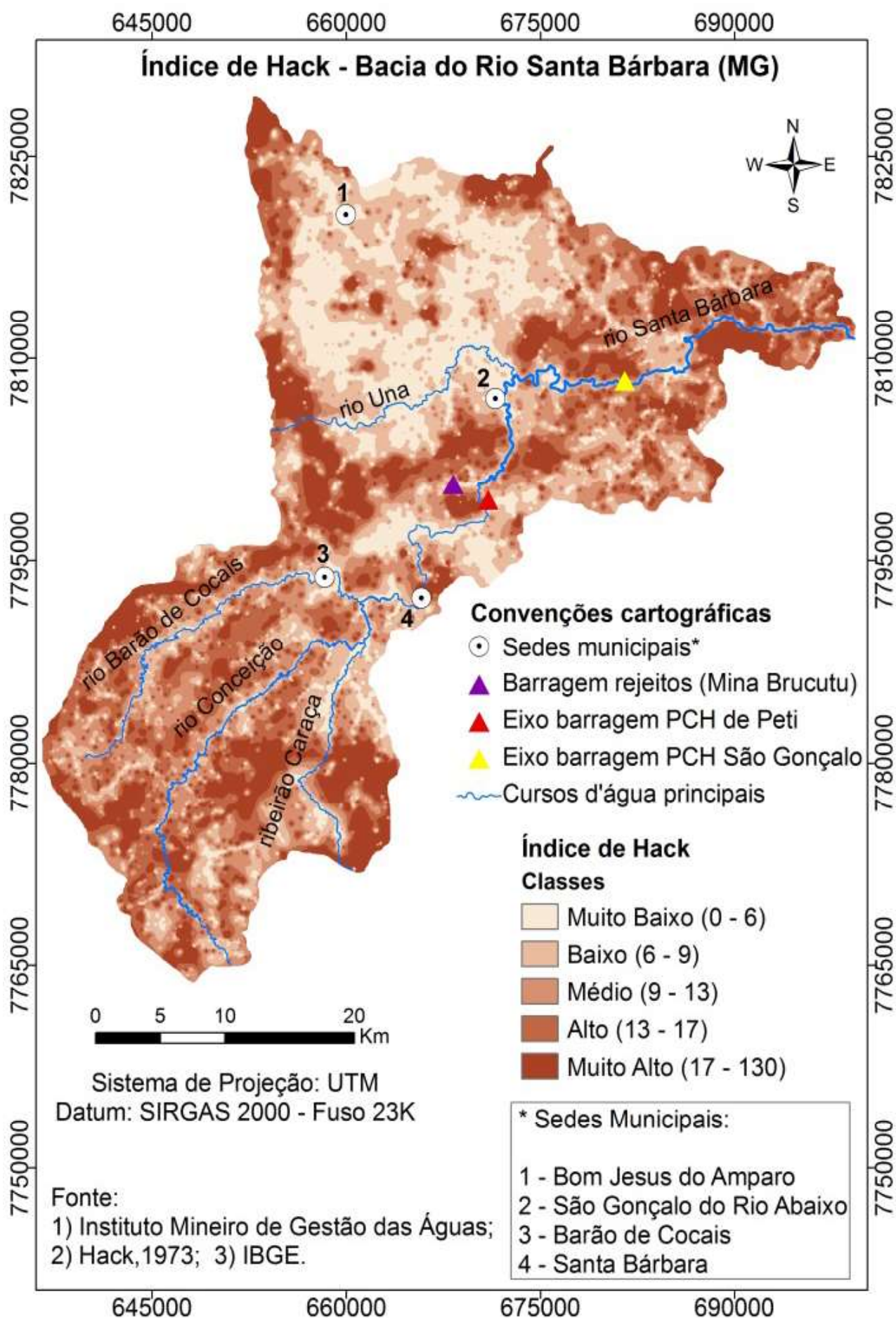


Fig. 7 – Mapa do Índice de Hack.

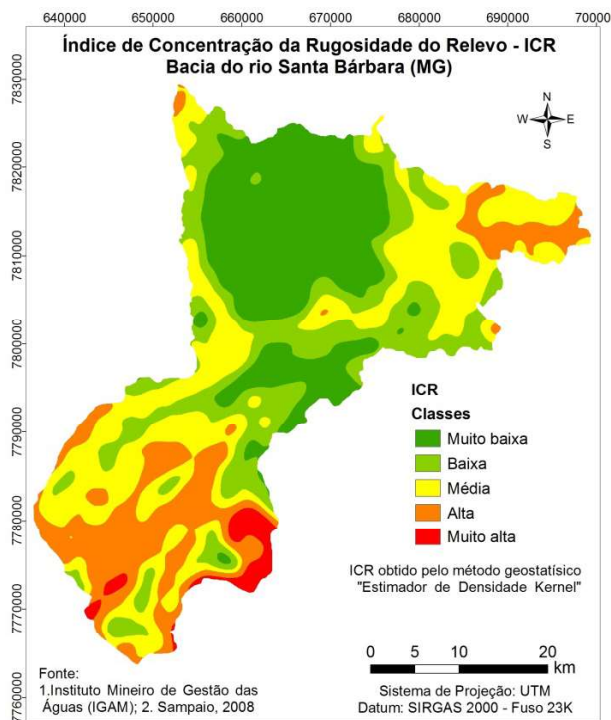


Fig. 8 – Mapa do ICR da bacia do rio Santa Bárbara.

Conforme se pode observar, a espacialização deste Índice apresenta semelhança com o resultado da espacialização do Índice de Hack.

3.4 Álgebra de mapas e Análise de multicritério

As operações de álgebra de mapas resultaram no mapa de Potencialidade à Erosão (Figura 9) que permitiu observar uma concentração de médio a muito alto potencial em parte da porção centro-sul da bacia do rio Santa Bárbara. Esta porção está associada às áreas de ocorrência de Cambissolos, de heterogeneidade geológica (xisto, metarenito, metapelito, quartzito e filito ferruginoso, por exemplo), de declividade acima de 30°, de solo exposto, de mineração e de pastagem. Cabe ressaltar que o médio e baixo potencial à ocorrência de processos erosivos, que predominam, na porção centro-sul da área de estudo ocorre devido a grande presença de cobertura vegetal arbórea.

À exceção do tema “Uso e Cobertura do Solo”, os demais temas receberam pesos equivalentes, por considerar que aquele representa uma variável chave na análise de processos erosivos. Tal ponderação é sustentada pelo fato de que a configuração espacial do uso

e cobertura do solo, sobretudo da tipologia de vegetação arbórea densa, é um fator limitante para a ocorrência de processos de erosão acelerada.

O mapa de potencialidade a erosão mostra ainda que a porção norte da bacia do rio Santa Bárbara, apesar de apresentar baixos valores de IH e ICR, possui um predomínio de áreas com potencial médio a erosão. Este fato pode ser explicado pelo predomínio de pastagens degradadas nesta porção da bacia e pela ponderação atribuída à variável uso e cobertura do solo. Por outro lado, as áreas urbanas de São Gonçalo do Rio Abaixo e Barão de Cocais localizam-se em zonas de baixo valor do IH e ICR e apresentam baixo potencial a erosão.

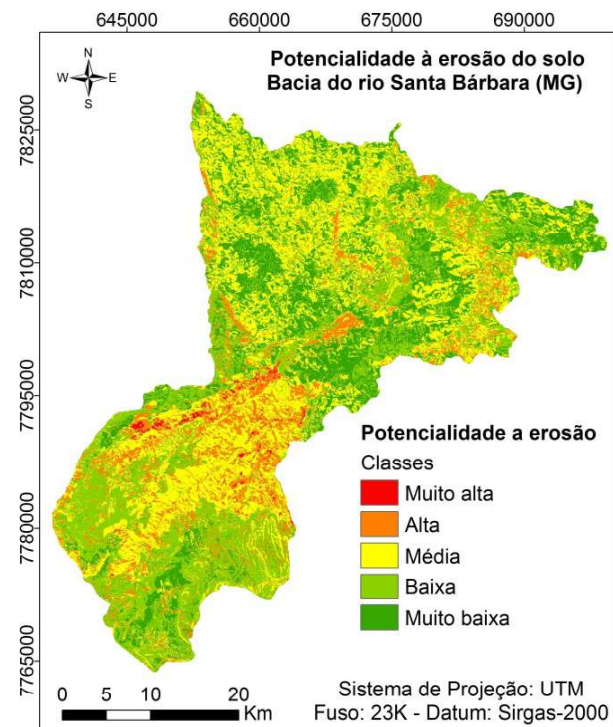


Fig. 9 – Mapa de Potencialidade à Erosão da bacia do rio Santa Bárbara.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As cenas da imagem LANDSAT 8 foram úteis neste estudo de abordagem regional. Sua aplicação para a obtenção do mapa de uso e cobertura do solo da bacia do rio Santa Bárbara permitiu identificar as tipologias de uso do solo predominantes, bem como fazer relações espaciais e observar conflitos entre tipologias naturais (fragmentos florestais) e antrópicas (pastagens, mineração, áreas urbanas e solo exposto).

Foi possível observar que a porção sudeste da bacia apresenta maior tendência à preservação, enquanto a porção centro-norte apresenta tendência à ocupação, já apresentando evidências claras de elevado grau de antropização. Essa dinâmica de uso e cobertura da terra pode, em parte, ser explicada pela impedância e pelo favorecimento relacionado ao fator relevo. Os índices IH e ICR apresentam valores elevados nas áreas onde é observada maior quantidade de fragmentos de vegetação arbóreo-arbustiva, indicando que nessas áreas as formações vegetacionais encontram-se preservadas pelo fator de impedimento ou impedância ao avanço das ações antrópicas, neste caso provocado pelo relevo dissecado pela ação da água que escoar por calhas fluviais e canais de drenagem com elevada energia, resultando em vales encaixados e de difícil acesso.

Por outro lado, onde os canais de drenagem apresentam baixa energia e o relevo possui baixa rugosidade não há impedâncias naturais topográficas para o avanço das ações antrópicas que resultam na fragmentação florestal e consequente aumento das áreas de pastagens, culminando na redução dos processos ecológicos.

De um modo geral os Índices de Hack (IH) e de Concentração da Rugosidade do Relevo (ICR) – figuras 7 e 8 – podem ser considerados como indicadores morfométricos de áreas com intensa atividade morfodinâmica, com implicações para a susceptibilidade à erosão dos terrenos.

Considerando os resultados alcançados, observa-se que as técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto, conforme apresentadas na metodologia, foram eficazes no mapeamento e caracterização dos processos morfodinâmicos (meio físico) e sua interface com o meio antrópico por meio da análise do uso e cobertura da terra.

O presente trabalho possui potencial para ser ampliado, incorporando análises exploratórias de dados espaciais, a exemplo da aplicação dos índices de Moran Local e Global, com vistas à avaliação quantitativa da relação espacial entre a susceptibilidade a erosão e os condicionantes morfométricos e morfológicos do relevo. Essa ampliação do trabalho resultará na definição dos níveis de fragilidade da bacia.

Destaca-se, ainda, a importância das

análises multicriteriais de susceptibilidade erosiva e sua interpretação em associação aos parâmetros morfométricos que refletem a incisão vertical dos canais de drenagem, a concentração da rugosidade do relevo e seus efeitos na dinâmica da paisagem.

A união destes procedimentos analíticos possui aplicabilidade em estudos de risco a desastres ambientais, a exemplo do ocorrido no município de Mariana, na bacia do rio Doce. Cabe ressaltar que a bacia hidrográfica do rio Santa Bárbara, sub-bacia do rio Doce, abriga quatro barragens próximas ao seu canal principal, sendo duas barragens de rejeito de minério de ferro (a barragem norte e a barragem sul da Mina de Brucutu) e dois barramentos voltados para a geração de energia elétrica (a PCH de Peti e a PCH São Gonçalo).

As análises aqui desenvolvidas poderão ainda compor o arcabouço metodológico de estudos ambientais relacionados à **dinâmica de barragens** de mineração e de geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHER, P.; ADINARAYANA, J.; GORANTIWAR, S. D. Prioritization of watersheds using multicriteria evaluation through fuzzy analytical hierarchy process. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 15, n. 1, p. 11-18, 2013.

ALTAJ, S.; MERAJ, G.; ROMSHOO, S. A. Morphometry and land cover based multicriteria analysis for assessing the soil erosion susceptibility of the western Himalayan watershed. **Environmental monitoring and assessment**, v. 186, n. 12, p. 8391-8412, 2014.

ARUN, P. S.; JANA, R.; NATHAWAT, M. S. A Rulebase physiographic characterization of a drought prone watershed applying remote sensing and GIS. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 189-201, 2005.

BAGYARAJ, M.; GURUGNANAM, B.; NAGAR, Annamalai. Significance of morphometry studies, soil characteristics, erosion phenomena and landform processes using remote Sensing and GIS for Kodaikanal Hills, a global biodiversity hotspot in Western Ghats, Dindigul District, Tamil Nadu, South India. **Research Journal of**

- Environmental and Earth Sciences**, v. 3, n. 3, p. 221-233, 2011.
- BARROS, R. S. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação obtidos através de sensores orbitais**. Tese (Doutorado) - Programa de pós-graduação em Geografia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 195p., 2006.
- BOCCO, G.; MENDOZA, M.; VELÁZQUEZ, A. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. **Geomorphology**, v. 39, n. 3, p. 211-219, 2001.
- CARVALHO, T.M.; LATRUBESSE, E.M. O uso de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. In: **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.5, n.1, p.85-93, 2004.
- CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo (GO), através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. In: **Revista Scientia Plena**, vol. 5, Nº 2, p. 1-7, 2009.
- CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba: Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná, 2003. 210 p.
- CHEREM, L. F. **Análise morfométrica da bacia do Alto Rio das Velhas - MG**. 2008. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Modelagem de Sistemas Ambientais. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais - IGC/ UFMG, 111 p. Belo Horizonte, 2008.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, 2ª ed. 186p.
- COSTA, C. T. F.; SILVA, F. R.; TAVARES, P. R. L. (2011). Aplicação de geoprocessamento na caracterização morfométrica da microbacia do riacho Touro (CE). **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió-Alagoas; p. 1-17, 2011.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 59, n. 5, p. 641-644, 1993.
- 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**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE-8454-RPQ/722. São Jose dos Campos, 2011. 124p.
- DIAS, M. O. **Análise quantitativa das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Jacuípe no estado da Bahia, Brasil**. (Monografia). Curso de Geologia. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 84p. Salvador, 2012.
- ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; PERINOTTO, J.A.J.; FULFARO, V.J. Aplicação do Índice “Relação Declividade-Extensão - RDE” na Bacia do Rio do Peixe (SP) para detecção de deformações neotectônicas, **Revista do Instituto de Geociências da USP - Série Científica**, v.4, n.2, p. 43-56, 2004.
- FARIA, A. L. L.; SILVA, J. X.; GOES, M. H. de B. Análise ambiental por geoprocessamento em áreas com susceptibilidade à erosão do solo na bacia hidrográfica do ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG). In: **Caminhos de Geografia. Revista on line**. Instituto de Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. V4(9) 50-65, jun/ 2003.
- FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica do Terreno**. Tutoriais. Inpe, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/modelagem.html>
- FONSECA, B. M. **O uso dos Sistemas de Informações Geográficas na Análise Morfométrica e Morfológica de Bacias de Drenagem na Serra do Espinhaço Meridional-MG**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia, da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010. 94p.
- FONSECA, B. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Use of GIS to calculate Hack Index as a basis for comparative geomorphologic analysis between two drainage basins: a case study from SE-Brazil. In: **International Geographic Union Regional Geographic Conference - UGI 2011, Santiago**.

- Military Geographic Institute of Chile(IGM), v. 1, p. 1-12, 2011.
- FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote sensing of environment**, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.
- FREIRE, A. J.; LAGE, G. B.; CHRISTÓFARO, C. Comparação entre parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas gerados por dados SRTM e ASTER GDEM: estudo de caso para bacias do Vale do Jequitinhonha-MG. **Anais. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Foz do Iguaçu. PR. 13 a 18 de abril de 2013. 5434-5440pp.
- GLOBAL VISUALIZATION VIEWER (GLOVIS). UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Disponível em <http://glovis.usgs.gov/> Acesso em 03 de agosto 2013
- GONZÁLEZ-ALONSO, F.; CUEVAS, J. M. Remote sensing and agricultural statistics: crop area estimation through regression estimators and confusion matrices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 6, p. 1215-1219, 1993.
- GONÇALVES, G. G. G.; DANIEL, O.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A. C. T.; ARAI, F. K. Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. **Revista Floresta**. Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. v. 41, n. 4, p. 797-808, out./dez. 2011
- HACK, J. T. **Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland**. United States Geological. Survey, Prof. Pap. 294-, 1957, pp. 45-97.
- _____. Stream-profile analysis and stream-gradient index: **U. S. Geological Survey Journal Research**, v. 1, n° 4, 1973. p. 421-429
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) - **Manuais: tutorial de geoprocessamento**. SPRING. 2008. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/>> Acesso em: 27 jun. 2016.
- JAIN, Sanjay K.; GOEL, M. K. Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS. **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, n. 1, p. 31-40, 2002.
- JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. **Anais. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais**. ABEP. Caxambu – MG – Brasil. 18 a 22 de setembro de 2006, p.1-22.
- LEWIS, H. G.; BROWN, M. A generalized confusion matrix for assessing area estimates from remotely sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 16, p. 3223-3235, 2001.
- LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International journal of Remote sensing**, v. 28, n. 5, p. 823-870, 2007.
- MAHAJAN, Sudhir; PANWAR, Pankaj. Land use changes in Ashwani Khad watershed using GIS techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 227-232, 2005.
- MENESES, P. R. ALMEIDA, T. de (orgs.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília. Brasília-DF. 276p. 2012. Disponível em: <<http://cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>> Acesso em: 16 ago. 2016
- MESSIAS, C. G.; TROVÓ, D. F. G. Dissecação do relevo do setor nordeste da carta topográfica de São José dos Campos: uma comparação entre os métodos de mapeamento manual e Índice de Concentração de Rugosidades. **Encontro de geógrafos da América Latina**. Peru. 2013.
- MOURA, A. C. M **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte, 3ª ed: Interciência., 286p. 2003.
- _____. Reflexões Metodológicas como Subsídio para Estudos Ambientais Baseados em Análise de Multicritérios. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil. Abril de 2007. P.2899-2906.
- _____. Discussões metodológicas para aplicação do modelo de Polígonos de Voronoi em estudos de áreas de influência fenômenos em ocupações urbanas – estudo de caso em Ouro Preto – MG. **Anais VII Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos - ENABER**, São Paulo, Brasil, 9-11,

2009, FEA/USP.

PARIZZI, M. G.; MOURA, A. C. M.; MEMORIA, E. MAGALHÃES, D. M. Mapa das unidades geotécnicas da Região Metropolitana de Belo Horizonte. In: **Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Belo Horizonte. 2010.

RAWAT, J.S.; JOSHI, R.C.; NIMACHOW, G. Terrain Characterization for Land Suitability Analysis of the Igo River Basin, Eastern Himalaya, Arunachal Pradesh, India. **Asian Journal of Geoinformatics**, v. 10, n. 4, 2010.

REDDY, Gangalakunta P. Obi; MAJI, Amal K.; GAJBHIYE, Kothiram S. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India—a remote sensing and GIS approach. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 6, n. 1, p. 1-16, 2004.

RODRIGUES, D. P.; NOLASCO, M. C.; JESUS, T. B. Geoprocessamento aplicado ao estudo da análise morfométrica: o caso da microbacia do rio Coisa Boa – Igatu – Chapada Diamantina – BA. **Anais. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba, PR. 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE .p.3947

SALLES, M. M. **O uso do SIG na análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio São João (MG)**. Monografia (Especialização em Geoprocessamento). Programa de Pós-Graduação do Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010. 29p.

SAMPAIO, T. V. M. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem – uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente – ES**. Tese de Doutorado. IGC/UFMG. Belo Horizonte, 197p., 2008.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Análise das incongruências dos índices de dissecação e rugosidade. **Anais. VII Encontro Nacional de Geomorfologia**. Belo Horizonte, v.1. 2008.

_____. **Índice de concentração da**

rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. In: **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 15, nº1 (jan-mar), p.47-60, 2014.

SANTOS, D. A. R.; MORAIS, F. (2012). Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Lago verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lagoa da Confusão (TO). In: **Revista Geonorte**. V.3, N.4, p. 617-629, 2012.

SOLANKE, P. C.; SRIVASTAVA, R. A. J. E. E. V.; PRASAD, J.; NAGARAJU, M. S. S.; SAXENA, R. K.; BARTHWAL, A. K. Application of remote sensing and GIS in watershed characterization and management. **Photonirvachak: Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 239-244, 2005.

SOUZA, L. F.; SAMPAIO T. V. M. (2010). Aplicação do Índice de Concentração da Rugosidade à identificação de classes de dissecação do relevo: uma proposta de quantificação e automatização em ambiente SIG. **Anais. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife-PE. 27 a 30 de julho de 2010.

VITTALA, S. Srinivasa; GOVINDAIAH, S.; GOWDA, H. Honne. Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada area of Tumkur district, South India using remote sensing and GIS techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 32, n. 4, p. 351-362, 2004.

VENEZIANI, P. **Análise de movimentos da tectônica rúptil e rúptil-dúctil através da interpretação de produtos de sensores remotos na região do Espinhaço meridional (MG): uma correlação com processos evolutivos**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987. 186 p.

WALSH, S. J.; BUTLER, D. R.; MALANSON, G. P. An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. **Geomorphology**, v. 21, n. 3, p. 183-205, 1998.