

Sandra Cristina Deodoro

**Análise da bacia do rio Santa Bárbara
(MG) baseada em análises
morfométrica e multicriterial**

XIV Curso de Especialização em Geoprocessamento 2013



UFMG
Instituto de Geociências
Departamento de Cartografia
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha
Belo Horizonte
cartografia@igc.ufmg.br

SANDRA CRISTINA DEODORO

**Análise da bacia do rio Santa Bárbara (MG) baseada em análises
morfométrica e multicriterial**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Geoprocessamento. Curso de Especialização em Geoprocessamento. Departamento de Cartografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: MSc Prof. Bráulio Magalhães Fonseca

Belo Horizonte - MG
2013



Universidade Federal de Minas Gerais

Instituto de Geociências
Departamento de Cartografia
Curso de Especialização em Geoprocessamento

Monografia defendida e aprovada em 06 de dezembro de 2013 pela banca
examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. MSc Bráulio Magalhães Fonseca – IGC/UFMG – Orientador

Prof. MSc Christian Rezende Freitas – IGC/UFMG

AGRADECIMENTO

Agradeço ao orientador Bráulio Magalhães Fonseca pelas importantes contribuições a este trabalho e transmissão de conhecimentos.

E à Bios Consultoria pelo apoio durante o curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	02
3. OBJETIVOS.....	07
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	08
4.1. Bacias hidrográficas e padrões de drenagem.....	08
4.2. Análise de bacias hidrográficas – Parâmetros morfométricos.....	09
4.2.1. Índice de Hack.....	10
4.2.2. Índice de Concentração da Rugosidade.....	11
4.2.3. Aplicações de técnicas de geoprocessamento na obtenção e análise de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas.....	12
4.3. Interpoladores geoestatísticos.....	15
4.4. Modelagem do terreno – Modelos Digitais de Elevação.....	17
4.5. Classificação de imagens.....	19
4.6. Análise de multicritério e Álgebra de mapas.....	21
5. METODOLOGIA.....	21
6. RESULTADOS E ANÁLISES.....	32
7. CONCLUSÕES.....	40
8. REFERÊNCIAS.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Santa Bárbara.....	03
Figura 2 – Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Santa Bárbara.....	04
Figura 3 – Mapa de grutas/cavernas e unidades de conservação da bacia do rio Santa Bárbara.....	05
Figura 4 – Mapa geológico da bacia do rio Santa Bárbara.....	06
Figura 5 – Mapa pedológico da bacia do rio Santa Bárbara.....	06
Figura 6 – Representação esquemática do cálculo do IH.....	11
Figura 7 – Imagem da bacia do rio Santa Bárbara na composição colorida 654RGB-LANDSAT 8.....	23
Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	31
Figura 9 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo da bacia do rio Santa Bárbara.....	33
Figura 10 – Mapa de espacialização do Índice de Hack da bacia do rio Santa Bárbara.....	35
Figura 10a – Mapa do Índice de Hack e Barramentos Hidrelétricos da bacia do rio Santa Bárbara.....	36
Figura 11a – Mapa de Declividade da bacia do rio Santa Bárbara.....	38
Figura 11b – Mapa do ICR da bacia do rio Santa Bárbara.....	38
Figura 12 – Mapa de Potencialidade à Erosão da bacia do rio Santa Bárbara.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de área territorial municipal inserida na bacia do rio Santa Bárbara.....	03
Tabela 2 – Tipos de classificação automática de imagens e classificadores.....	20
Tabela 3 – Características espectrais dos instrumentos imageadores LANDSAT-8.....	22
Tabela 4 - Elementos de interpretação da imagem LANDSAT-8 (654RGB) – Bacia do rio Santa Bárbara.....	26
Tabela 5 – Ponderação (%) de cada tema das variáveis.....	28
Tabela 6 – Notas das variáveis relacionadas à Pedologia.....	29
Tabela 7 – Notas das variáveis relacionadas à Geologia.....	29
Tabela 8 – Notas das variáveis relacionadas à Declividade.....	30
Tabela 9 – Notas das variáveis relacionadas ao Uso e Cobertura do Solo.....	30
Tabela 10 – Resumo do desempenho da classificação – Método Max-Ver.....	32

RESUMO

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 processo morfogenético dos mais ativos na esculturação da paisagem terrestre (CHRISTOFOLETTI, 1980). A análise multicriterial, através da álgebra de mapas, é um procedimento importante em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) por produzir resultados para análise e síntese da informação. Este trabalho tem como foco a aplicação das técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto para a análise da (sub) bacia do rio Santa Bárbara (MG), integrante da bacia do rio Doce, a partir de alguns parâmetros morfométricos (Índices de Hack e de Concentração da Rugosidade do Relevo), de características geológicas, pedológicas, de declividade e de uso e cobertura do solo, através de procedimentos geoestatísticos e de álgebra de mapas (análise multicriterial) para avaliar a potencialidade a erosão da bacia. A metodologia utilizada envolveu bases temáticas pré-existentes de hidrografia (IGAM), geologia (CPRM), solos (UFV-UFLA-FEAM) e declividade (curvas de nível TOPODATA-INPE). Para o mapa de uso e cobertura do solo utilizou-se a imagem LANDSAT-8, 654RGB e realizou-se classificação pelo método Max-Ver. Para o mapa de 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. Como complemento da análise multicriterial comparou-se esta às análises morfométricas. 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 (muito baixa a média), onde ocorre maior ocupação antrópica; (ii) a bacia do rio Santa Bárbara apresenta vigor energético alto a muito alto na maior parte de sua área, sendo que o barramento (eixo) das represas hidroenergéticas existentes (Peti e São Gonçalo) coincidem com esta faixa; (iii) consistem com a realidade física e antrópica da bacia por conhecimento prévio da área de estudo. Desta forma, pode-se considerar que as análises morfométrica e multicriterial, apoiadas em procedimentos geoestatísticos e SIG, constituem em ferramentas eficazes nos trabalhos de planejamento e gestão territorial, principalmente se realizadas de forma inter-relacionada.

Palavras chave: parâmetros morfométricos, Índice de Hack, Índice de Concentração da Rugosidade, análise multicriterial, geoestatística, potencialidade a erosão

1. INTRODUÇÃO

O conceito bacia hidrográfica passa pela compartimentação geográfica natural do relevo, delimitada por seus divisores de água que demarcam seu contorno, drenada superficialmente por um curso d'água principal e seus afluentes. Desta forma, o reconhecimento da bacia hidrográfica como unidade de gestão integrada requer interdependência das interações do sistema ambiental e seus componentes físicos, biológicos e antrópicos.

Tal reconhecimento reflete-se na obrigatoriedade da elaboração dos Planos de Recursos Hídricos, previstos na Lei Federal 9433/97 que dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos. Correspondem a planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação desta Política bem como o gerenciamento dos recursos hídricos. Estes Planos compreendem duas partes: Diagnóstico e o Plano Diretor propriamente dito.

É na primeira fase de elaboração do Plano Diretor de Recursos Hídricos que esta Monografia se relaciona (análise de bacia hidrográfica em referencia aos parâmetros físicos), pois o diagnóstico do Plano deve ser elaborado interdisciplinarmente aos componentes físico, biótico, socioeconômico e institucional, que seja capaz de identificar as relações entre as estruturas antrópicas e as do meio natural.

De acordo com Christofolletti (1980), 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. Os índices e parâmetros sugeridos para tal análise estão agrupados em quatro temáticas: hierarquia fluvial, análise areal, análise linear e análise hipsométrica.

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 processo morfogenético dos mais ativos na esculturação da paisagem terrestre (CHRISTOFOLETTI, 1980). Existem várias aplicações para tal técnica, principalmente para um planejamento ambiental adequado, tais como, na identificação de inundações, de enchentes e de erosão. Contribui desta forma, como ferramenta de suporte para o planejamento territorial.

Em função do uso e ocupação do solo, as bacias hidrográficas têm sofrido alterações na estrutura física dos canais, no aporte de sedimentos, nos aspectos ecológicos, no regime hidráulico e no fluxo de matéria e energia.

Neste contexto, as técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG auxiliam os estudos de análise de bacias hidrográficas no que se refere à agilidade e a sistematização do cálculo dos parâmetros morfométricos bem como a comparação entre eles. Além disso, constituem-se em instrumento de gestão de recursos hídricos por contribuir para o Sistema de Informações de Recursos Hídricos de uma bacia hidrográfica, conforme previsto na Lei Federal 9433/97.

Esta monografia tem como foco a aplicação das técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto para análise ambiental da bacia do rio Santa Bárbara a partir de alguns parâmetros morfométricos, de características geológicas, pedológicas, topográficas e de uso e cobertura do solo, através de procedimentos geoestatísticos e de álgebra de mapas (análise multicriterial).

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho é a (sub)bacia do rio Santa Bárbara, afluente do rio Piracicaba, na porção alta da bacia federal do 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, conforme se pode observar na Figura 1 seguinte.

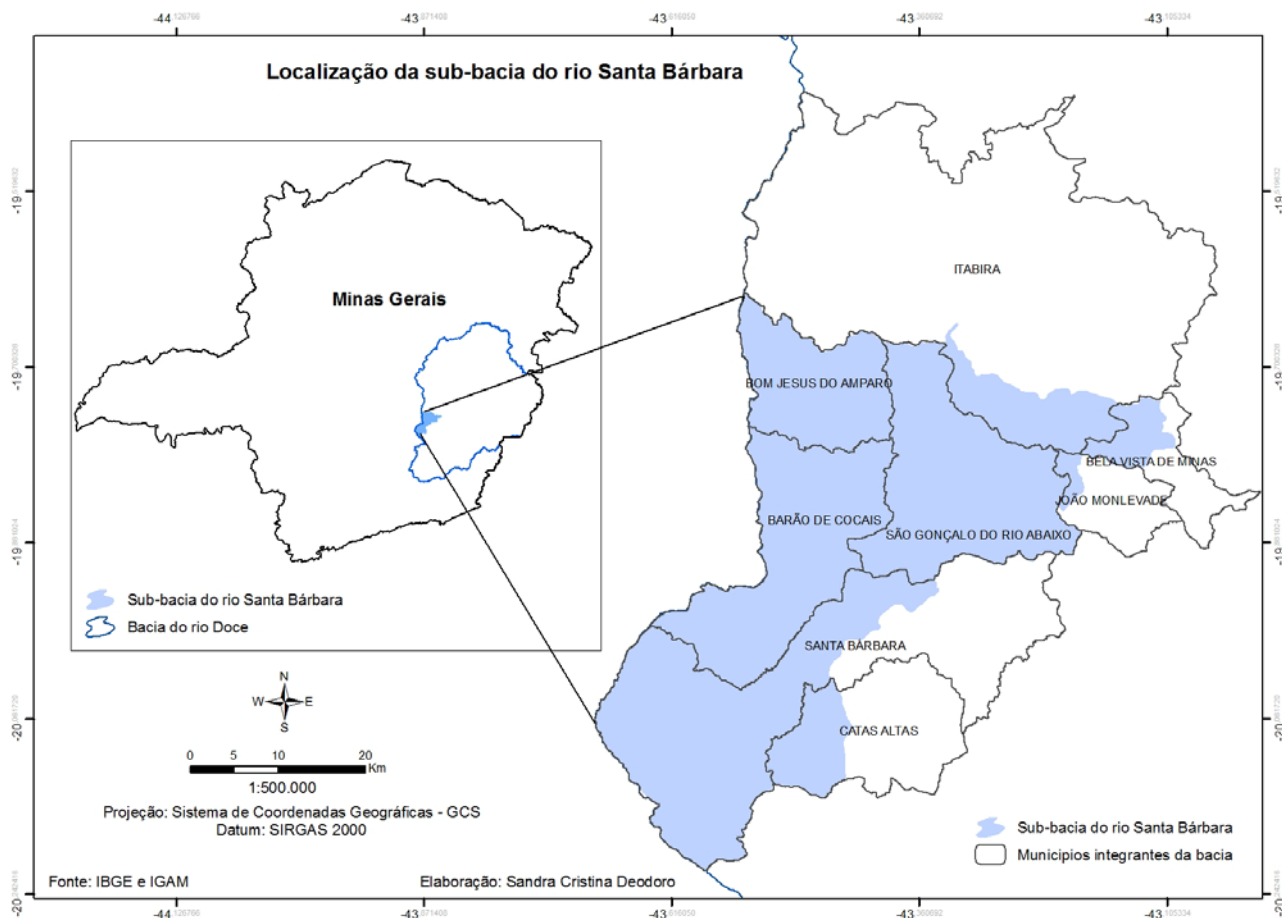


Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Santa Bárbara

Os territórios dos municípios de Barão de Cocais, Bom Jesus do Amparo e São Gonçalo do Rio Abaixo estão totalmente inseridos na bacia. A Tabela 1 apresenta a participação territorial (%) dos municípios na bacia do rio Santa Bárbara.

Tabela 1 – Porcentagem de área territorial municipal inserida na bacia do rio Santa Bárbara

Município	Área (Km ²)	Área na bacia (Km ²)	%
Barão de Cocais	340,5376645	340,5376645	100
Bela Vista de Minas	109,1620336	43,04460964	39
Bom Jesus do Amparo	195,5791598	195,5791598	100
Catas Altas	240,0146681	76,50527214	32
Itabira	1253,690949	112,49316	9
João Monlevade	99,16927626	13,56255931	14
Santa Bárbara	683,9464607	450,3258913	66
São Gonçalo do Rio Abaixo	363,7989576	363,7989576	100

A bacia do rio Santa Bárbara apresenta uma rede de drenagem densa, de padrão predominantemente dendrítico, principalmente na porção centro-norte, conforme se pode observar na Figura 2.

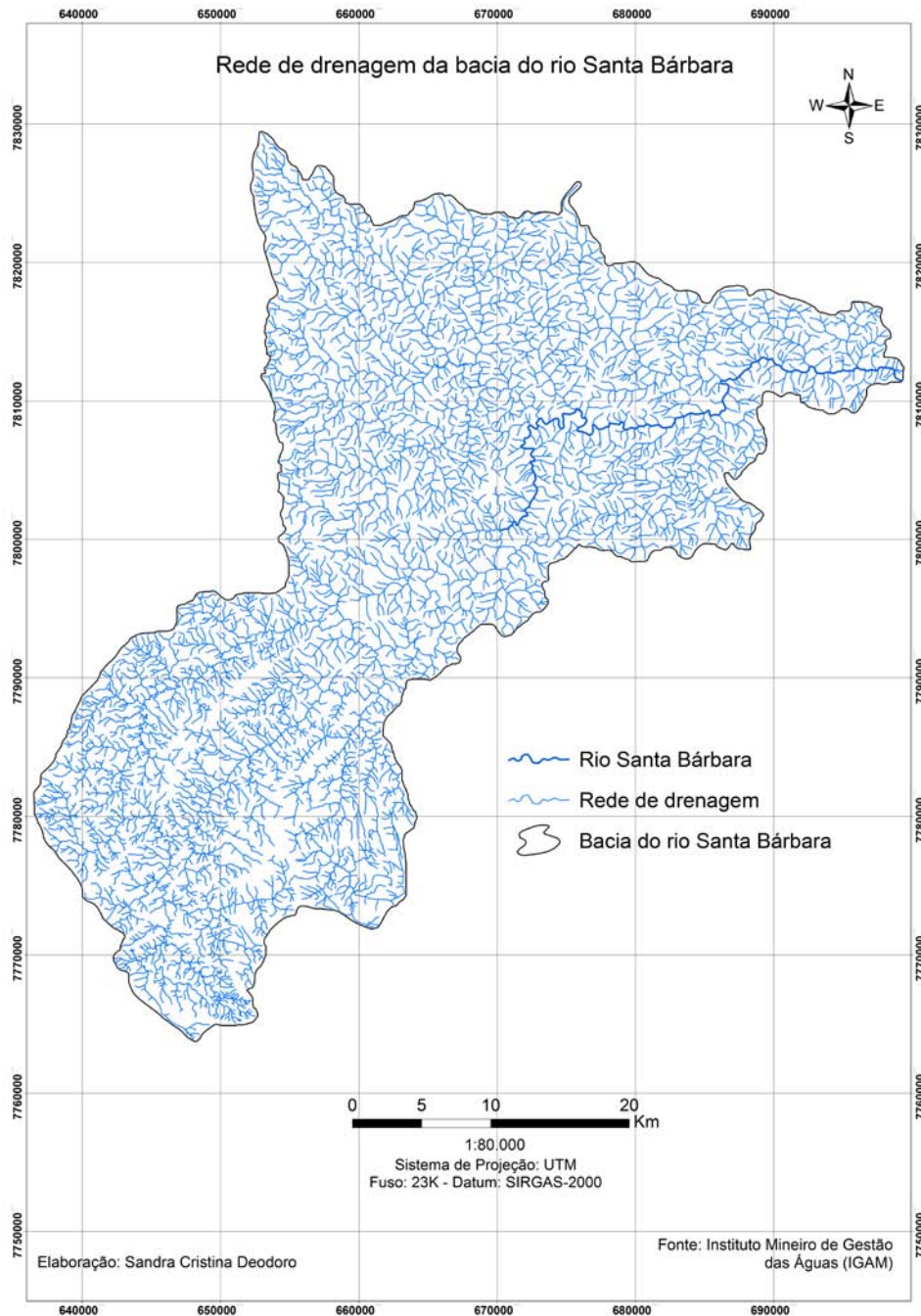


Figura 2 – Mapa da rede de drenagem da bacia do rio Santa Bárbara

Como elementos físicos tem-se, no fator geológico da área de estudo, a região do sinclinal gandarela e as cangas; no geomorfológico, a serra do Caraça; nos recursos hídricos, as

nascentes e a densidade da rede de drenagem, além dos reservatórios de Peti e da PCH São Gonçalo; remanescentes de Mata Atlântica e campos de altitude constituindo importantes unidades de conservação; no fator antrópico, destacam-se as atividades minerárias e turísticas, além dos sítios arqueológicos em Barão de Cocais e em São Gonçalo do Rio Abaixo.

Destes fatores, o geológico é de suma importância devido à variabilidade estrutural e litológica condicionantes das geformas locais e que produzem paisagens heterogêneas em feições de relevo. As unidades geológicas que se destacam são o Quartzito Cambotas, o Grupo Itabira (itabirito, itabirito filítico e dolomítico; hematita), Grupo Nova Lima (xisto, filito, rochas metavulcânicas e formação ferrífera) e o embasamento de rochas granito-gnaisses. As Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, as cavernas e unidades de conservação, a litologia e a pedologia da bacia do rio Santa Bárbara.

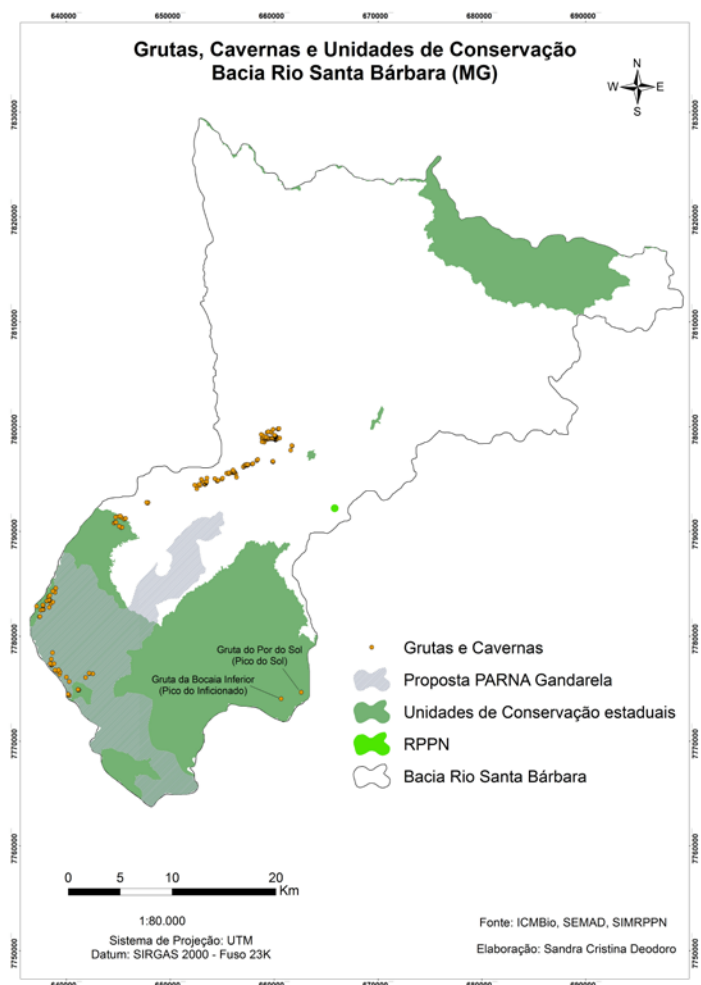


Figura 3 – Mapa de grutas/cavernas e unidades de conservação da bacia do rio Santa Bárbara

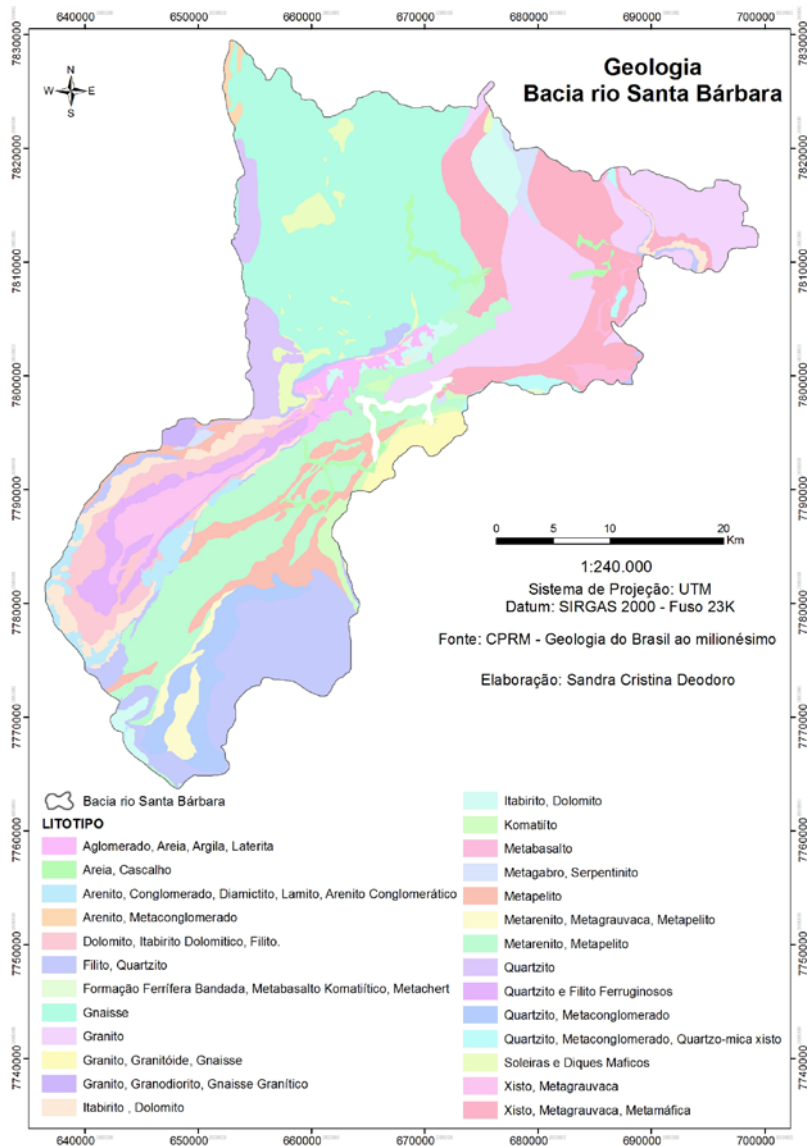


Figura 4 – Mapa geológico da bacia do rio Santa Bárbara

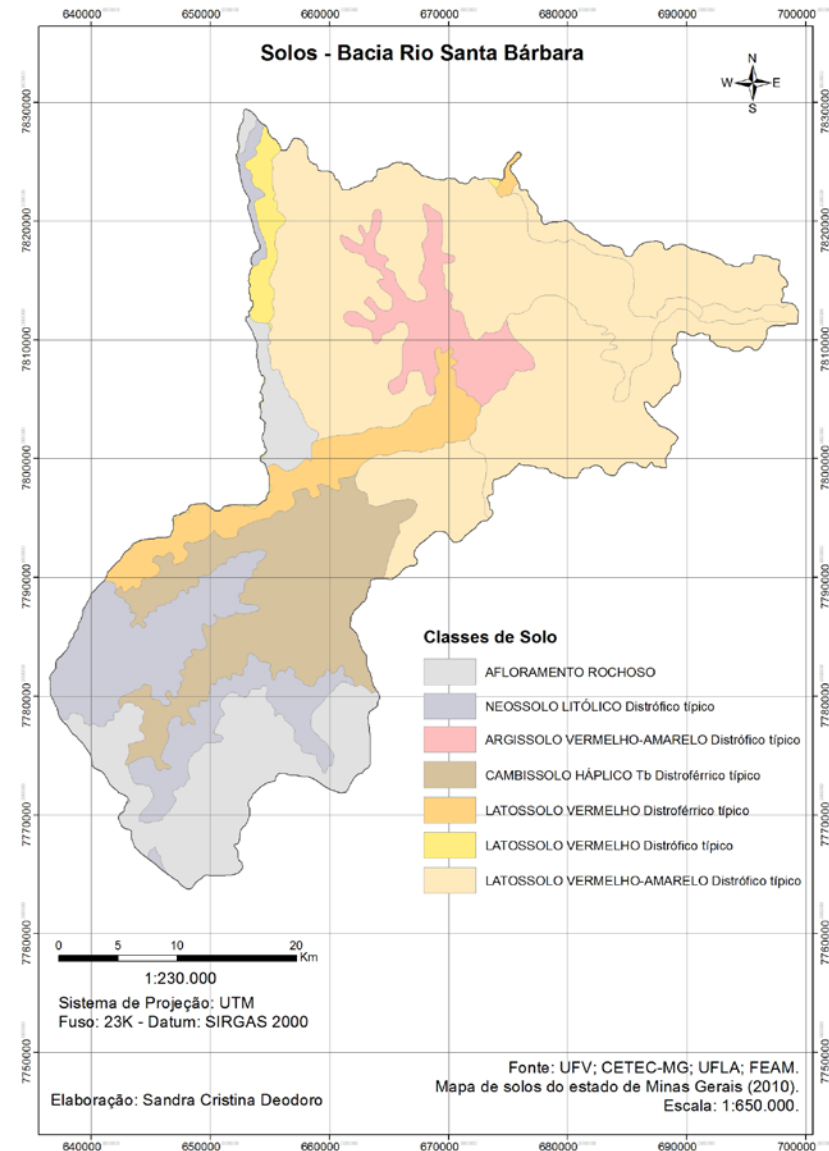


Figura 5 – Mapa pedológico da bacia do rio Santa Bárbara

De maneira geral, pode-se dizer que a bacia do rio Santa Bárbara 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 LITÓLICO e CAMBISSOLO), relevos colinosos e dissecados e por cobertura de Mata Atlântica, Cerrado e Campos de Altitude, induzindo o uso preservacionista, conforme pode ser observado na Figura 3; e (ii) porção centro-norte, com litologias variadas, solos mais evoluídos (LATOSSOLOS E ARGISSOLO), com cobertura vegetal antropizada representada por pasto e eucalipto, onde se assentam as manchas urbanas dos municípios de abragência e infraestruturas de acesso, indicando o uso para ocupação.

Desta forma, a bacia do rio Santa Bárbara destaca-se pelo conflito de interesses no que se refere ao uso dos recursos hídricos e de uso e ocupação do solo, representados pelo interesse minerário e ambientalista, sendo este último representado pela RPPN Santuário da Serra do Caraça e pela proposta de criação do PARNA Serra do Gandarela.

3. OBJETIVOS:

O **objetivo geral** deste trabalho é utilizar as técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto na caracterização da bacia do rio Santa Bárbara através dos Índices de Hack e de Concentração da Rugosidade do Relevo, dos procedimentos de classificação de imagem e álgebra de mapas (análise de multicritério) para avaliar a potencialidade aos processos erosivos.

Os **objetivos específicos** são:

- Conhecer algumas características zonais, lineares e hipsométricas da bacia do rio Santa Bárbara;
- Identificar pontos de energia potencial fluvial da bacia e de potencialidade à erosão;
- Verificar a eficiência das técnicas de geoprocessamento nos cálculos e análises dos parâmetros morfométricos e, portanto, na análise de bacias hidrográficas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Bacias hidrográficas e padrões de drenagem

Numa bacia hidrográfica, as drenagens fluviais e o relevo apresentam estreita relação e podem indicar o seu comportamento dinâmico, como por exemplo, nos processos de erosão natural e na produção de sedimentos. De acordo com Christofolletti (1980), os cursos de água constituem processo morfogenético dos mais ativos na esculturação da paisagem terrestre.

Os processos erosivos tendem a ser mais intensos na região da alta bacia hidrográfica onde os canais de primeira ordem, por desenvolverem-se em terrenos com os maiores declives da bacia hidrográfica, possuem alta energia (CASTRO & CARVALHO, 2009).

A quantidade de água que atinge os cursos fluviais depende do tamanho da área ocupada pela bacia, da precipitação total e de seu regime (da forma como o rio é alimentado) e das perdas devidas à evapotranspiração e à infiltração, correspondendo ao ciclo hidrológico.

William Davis *apud* Christofolletti (1980) propôs uma classificação para os rios, considerando o escoamento em relação à inclinação das camadas geológicas. Desta forma, tem-se (i) *consequentes*, quando o curso é determinado pela declividade da superfície, coincidindo com a inclinação das camadas geológicas. Formam cursos de lineamento reto em direção às baixadas (drenagem paralela); (ii) *subsequentes*, quando a direção de fluxo é controlada pela estrutura rochosa, acompanhando zonas de fraqueza (falhas, juntas); (iii) *obsequentes*, são os rios que correm em sentido inverso à inclinação das camadas; (iv) *ressequentes*, são os rios que, em geral, nascem no reverso de escarpas e fluem até desembocar em um rio subsequente; e (v) *insequentes*, são aqueles nos quais nenhum controle geológico se torna visível na disposição espacial da drenagem. São comuns nas áreas onde a topografia é plana e em áreas de homogeneidade litológica, por exemplo, nas graníticas.

O arranjo espacial dos rios, em conjunto e em função do escoamento, formam os padrões de drenagem, sendo os mais conhecidos, os padrões (i) *dendrítico*, quando a drenagem é desenvolvida sobre rochas de resistência uniforme, ou em estruturas sedimentares horizontais.

Este padrão assemelha-se à configuração de uma árvore; (ii) *drenagem em treliça*, quando as confluências realizam-se em ângulos retos; (iii) *drenagem retangular*, influenciada pelas falhas ou pelo sistema de juntas ou diáclases e apresenta, portanto, aspecto ortogonal; (iv) *drenagem paralela*, ocorre em áreas com vertentes de declividades acentuadas ou onde existem controles estruturais responsáveis pela ocorrência de espaçamento regular, quase paralelo, dos cursos de água; (v) *drenagem radial*, quando as drenagens formam padrão semelhante aos raios de uma roda em relação a um ponto central; e (vi) *drenagem anelar*, padrão típico das áreas dômicas entalhadas em estruturas com camadas duras e frágeis.

4.2. Análise de bacia hidrográfica – parâmetros morfométricos

A análise morfométrica de bacias hidrográficas é um importante recurso para caracterizar e identificar a dinâmica de um sistema fluvial. Corresponde à expressão quantitativa, em valores dimensionais, relacionados à sua fisiografia, e que permitem eliminar a subjetividade na sua caracterização.

De acordo com Christofolletti (1980), 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.

Os índices e parâmetros sugeridos para tal análise estão agrupados em quatro temáticas: hierarquia fluvial, análise areal, análise linear e análise hipsométrica. A análise morfométrica de bacias hidrográficas inicia-se pela ordenação dos canais fluviais e, posteriormente, processa-se a análise dos aspectos lineares, areais e zonais.

A hierarquia fluvial corresponde à classificação dos cursos de água no conjunto total da bacia hidrográfica. Há duas classificações, uma proposta por Horton em 1945 e, outra, proposta por Strahler, em 1952. Esta última é a mais utilizada e elimina o conceito de que o rio principal deve ter o mesmo número de ordem em toda a sua extensão e a necessidade de se refazer a numeração a cada confluência. A *lei do número de canais* refere-se à relação de bifurcação entre as várias ordens e pode ser aplicada em ambas as propostas de hierarquização fluvial.

Sem mensurações, esta lei considera somente o ponto de origem e a confluência dos segmentos.

A *análise linear* refere-se aos índices e relações ao longo do fluxo da rede de drenagem e citam-se (i) Relação de bifurcação, (ii) Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem, (iii) Relação entre o índice do comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação, (iv) Comprimento do rio principal, (v) Extensão do percurso fluvial, (vi) Relação do equivalente vetorial e (vii) Gradiente dos canais.

A *análise areal* engloba índices relacionados à geometria da bacia hidrográfica, às medições planimétricas e lineares, tais como (i) Área da bacia, (ii) Comprimento da bacia, (iii) Relação entre o comprimento do rio principal e a área da bacia, (iv) Forma da bacia, (v) Densidade de rios, (vi) Densidade da drenagem, (vii) Densidade de segmentos da bacia, (viii) Relação entre as áreas das bacias e (ix) Coeficiente de manutenção.

A *análise hipsométrica* baseia-se nas interrelações existentes em uma bacia hidrográfica no que se refere à distribuição das faixas altimétricas. Os parâmetros hipsométricos correlacionam a variação altimétrica à área e a rede de drenagem de uma mesma bacia, sendo representados por (i) Curva hipsométrica (ii) Coeficiente de massividade e o coeficiente orográfico, (iii) Amplitude altimétrica máxima da bacia, (iv) Relação de relevo e (v) Índice de rugosidade.

Neste trabalho, são utilizados os Índices de Hack e de Concentração de Rugosidade do Relevo.

4.2.1. Índice de Hack (IH)

Trata-se da relação entre o comprimento do rio principal e a área da bacia, proposta por Hack em 1957 e 1973, em perfis longitudinais de rios, denominada de *Stream Length-Gradient Index* (SL Index). No Brasil ela é também conhecida como Relação Declividade-Extensão (RDE) e consiste na seguinte fórmula:

$$SL = (h/l) * L$$

Sendo SL o índice (Stream-Lenght), h a diferença entre a altura máxima e a mínima do trecho do canal estudado, l é a projeção horizontal do trecho a ser estudado e L é o comprimento do ponto mais a jusante do trecho estudado à cabeceira da bacia em linha reta.

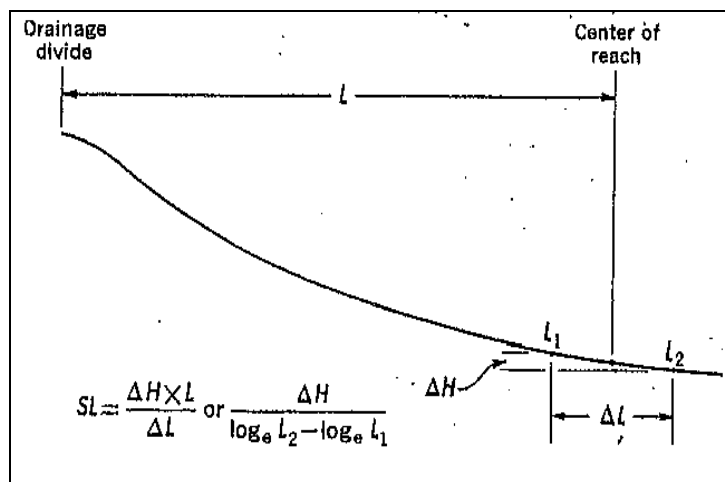


Figura 6 – Representação esquemática do cálculo do IH. Fonte: Hack, 1973

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

4.2.2. Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)

O ICR utiliza a geoestatística 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” (OLIVEIRA et al., 2011 *apud* MESSIAS & TROVÓ, 2013).

De acordo com Christofolletti (1980), o Índice de Rugosidade (Ir) foi inicialmente proposto por Melton (1957) para expressar um dos aspectos da análise topográfica. Este índice combina as qualidades de declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem. O resultado é um número adimensional do produto entre a amplitude altimétrica (H) e a densidade de drenagem (Dd), conforme a seguinte fórmula:

$$Ir = H * Dd$$

onde H => amplitude altimétrica e Dd => densidade de drenagem. De acordo com Strahler, valores altos do Ir ocorrem quando ambos os valores são elevados (quando as vertentes são ígremes e longas).

4.2.3. Aplicações de técnicas de geoprocessamento na obtenção e análise de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas

A análise 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. 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.

Souza & Sampaio (2010) utilizaram o Índice de Concentração da Rugosidade do relevo com o objetivo de colaborar com as técnicas de mapeamento geomorfológico, através da elaboração de um padrão numérico para o mapeamento de diferentes níveis de dissecação do relevo no Estado do Paraná. Os materiais e métodos utilizados foram imagem SRTM, mapa de declividade, estimador de densidade Kernel e comparação do mapeamento geomorfológico do estado do Paraná. Como principal resultado, os autores encontraram as classes e intervalos de ICR nem sempre equivalentes para todas as áreas do Mapeamento Geomorfológico do Paraná

uma vez que o mesmo não segue um padrão único de classificação. E consideraram que o ICR constitui interessante ferramenta para construção de um padrão cartográfico e geomorfológico de representação do relevo através de um SIG.

Cherem (2008) utilizou os parâmetros morfométricos, baseados em Christofolletti (1980) para compartimentar a bacia do alto rio das Velhas, através de três etapas metodológicas principais: 1) geração de MDE e de rede hidrográfica compatíveis à escala de análise, quando é testada a capacidade de MDE e da rede de drenagem derivada deles em representar o relevo e a drenagem com consistências hidrológica e morfológica; 2) extração dos parâmetros morfométricos; 3) análise morfométrica. Os materiais utilizados foram cartas topográficas do IBGE para a área de estudo, em escala 1:50.000 e o MDE da SRTM com resolução espacial de 90 m. Como método geoestatístico, utilizou-se a Krigagem ao MDE-SRTM da área de estudo para melhorar a resolução espacial. Para verificar o sucesso da interpolação, comparou-se o MDE interpolado ao MDE original através da curva hipsométrica e da variação da distribuição acumulada por faixa altimétrica.

Em trabalho semelhante, Santos & Morais (2012) caracterizam morfométrica e morfologicamente a bacia hidrográfica do rio Lago Verde, afluente do rio Formoso, inseridos no médio rio Araguaia na porção centro-oeste do estado do Tocantins, com o objetivo de compreender a morfogênese e a morfodinâmica de sua paisagem. Os materiais utilizados foram dados de pedologia e clima, na escala de 1:100.000; informações geológicas vetoriais do mapeamento sistemático do Serviço Geológico do Brasil na escala de 1:1.000.000; imagens do satélite ResourceSat sensor Liss 3, resolução espacial de 24 metros e dados topográficos do projeto TOPODATA na resolução espacial de 30 metros, disponibilizados pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Mapas de hierarquia fluvial, declividade e hipsometria foram elaborados. Os parâmetros morfométricos utilizados foram *densidade hidrográfica*, *densidade de drenagem*, *índice de sinuosidade*, *coeficiente de manutenção*, *gradiente de canais*, *relação de relevo* e *índice de circularidade*. Os resultados mostraram que (i) a bacia se desenvolve sobre rochas sedimentares e coberturas Quaternárias, apresentando padrão de drenagem dendrítico; (ii) a bacia possui baixa declividade, propiciando as inundações periódicas; (iii) a bacia do Lago Verde sofre influência de

movimentos neotectônicos decorrentes da bacia sedimentar do Bananal, em fase de formação, com pequenas falhas perpendiculares ao canal principal.

Salles (2010) realizou análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio São João, inserida na bacia do rio Doce, a nordeste da serra da Gandarela, nos municípios de Santa Barbara e Barão de Cocais, no estado de Minas Gerais, com o objetivo de comprovar que tal bacia possui morfodinâmica diferenciada. Como materiais e métodos, o autor utilizou cartas topográficas da região (IBGE) e imagem ASTER, para geração do Modelo Digital de Elevação (MDE). A partir do MDE, obteve-se a rede de drenagem e calcularam-se alguns parâmetros morfométricos de bacia hidrográfica, sendo eles Área, Perímetro, Compacidade, Fator de Forma, Índice de Circularidade, Densidade de Drenagem e Índice de Hack. Para o tratamento geostatístico, utilizou o interpolador IDW para identificar zonas drenadas por cursos de água com o mesmo vigor energético, e o Diagrama de Voronoi para delimitar as áreas de influência dos valores do Índice de Hack. De acordo com os resultados obtidos, o autor afirmou que a bacia hidrográfica do rio São João possui maior vigor energético nas cabeceiras e mostra-se pouco suscetível à enchentes em condições normais de precipitação.

No trabalho intitulado *Geoprocessamento aplicado ao estudo da análise morfométrica: o caso da microbacia do rio Coisa Boa – Igatu – Chapada Diamantina – Ba*, Rodrigues *et al* (2011) realiza as análises hierárquica, areal e hipsométrica através dos parâmetros *relação de bifurcação*; *comprimento do canal principal (Lm)*; *área da bacia (A)*; *perímetro da bacia (P)*; *comprimento da bacia (L)*; *fator forma (F)*; *coeficiente de compacidade (Kc)*; *índice de circularidade (Ic)*; *densidade de rios (Dr)*; *densidade de drenagem (Dd)*; *coeficiente de manutenção (Cm)*. Criou-se um banco de dados geográficos contendo MDT/SRTM, mapas hipsométricos e declividade, curvas de nível, pontos cotados, limite da bacia, sistema de drenagem, a hierarquia de canais e pontos de dados GPS. Como resultados, verificaram que os valores da relação de bifurcação encontrados para cada ordem dos canais indicam que a maioria dos canais tem forte dissecção; os autores verificaram, também, que a bacia apresenta forma alongada.

Costa *et al* (2011) realizaram caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica do riacho do Touro, em Juazeiro do Norte, no estado do Ceará. Através de cartas topográficas,

gerou-se o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) a partir do qual calcularam-se alguns parâmetros morfométricos para o estudo do comportamento hidrológico da bacia. Os resultados obtidos foram área de drenagem: 61,331 km²; perímetro da bacia: 2,827 km; coeficiente de compacidade: 1,531; fator de forma: 0,237; índice de circularidade de 0,420; densidade de drenagem: 0,44 km/km². Os autores concluíram que a microbacia tem formato alongado e baixa densidade de drenagem; a forma alongada da microbacia hidrográfica indica que a pluviometria sobre a mesma se concentra em diferentes pontos, o que ameniza a influência da intensidade de chuvas que poderia causar maiores vazões do curso d'água principal.

Por fim, Freire *et al* (2013) comparou a influência da resolução de imagem SRTM e ASTER na obtenção dos parâmetros morfométricos de cinco sub-bacias do rio Jequitinhonha: ribeirões Caraíbas, da Ilha do Pão, Prates, Pasmado e Santo Antônio. A hidrografia das sub-bacias foi extraída de ambas as imagens. Os parâmetros utilizados foram perímetro, área, coeficiente de compacidade, comprimento total de canais, declividade e densidade de drenagem. Os autores observaram que, a partir dos resultados das áreas e dos perímetros, estes não diferiram significativamente. Todos os valores dos coeficientes obtidos foram maiores para a unidade 1, indicando que as sub-bacias são de forma alongada. Comparando-se os comprimentos de canais de drenagem entre as imagens, perceberam que, na imagem ASTER, estes tendem a ser mais elevados, devido a uma melhor resolução da imagem, resultando ainda, numa delimitação mais detalhada das bacias.

4.3. Interpoladores 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. Esse conceito também fundamenta a base das relações espaciais entre fenômenos geográficos, utilizando a correlação espacial como meio de diferença dos atributos estimados. 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).

Lourenço (1998) *apud* Jakob & Young (2006) aponta que os mapas de isovalores, que mostram a variabilidade dos dados, são resultados cada vez mais comuns que se espera dos SIGs, assim como as estimativas dos dados de pontos não amostrados, por meio de valores em pontos amostrados.

Os métodos de interpolação mais comuns dos 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.

De acordo com Jakob & Young (2006) alguns métodos continuam a ter uma grande aplicação na cartografia de fenômenos espaciais, suas vantagens e desvantagens.

Existe um conjunto particular de métodos determinísticos que não pretendem caracterizar completamente um fenômeno físico através do conjunto de fatores que estão na sua origem, mas tem simplesmente como objetivo a interpolação espacial dos valores observados. Trata-se de um dos problemas básicos da análise espacial, que a geoestatística propõe resolver através de uma metodologia probabilístico-estocástica. 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**, utilizado nesta monografia, emprega o modelo estatístico denominado “Inverso das Distâncias”. O modelo baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores. Dessa forma atribui maior peso para as amostras mais próximas do que para as amostras mais distantes do ponto a ser interpolado. Assim 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.

Segundo aqueles autores, o IDW é um método interpolador exato e poucas decisões são tomadas acerca dos parâmetros do modelo.

Este método pode ser adequado para uma visualização ou interpretação preliminar da interpolação de uma superfície, entretanto, não é realizada uma avaliação da predição de erros, que pode produzir um efeito “*bulls eyes*” ao redor da localização do dado, pequenas áreas que se diferenciam da suavização geral da variável. Este método assume que a superfície possui uma variação local, e funciona melhor se os pontos amostrais estão igualmente distribuídos pela área, sem estarem concentrados em determinado local. Os parâmetros mais importantes a se detectar, então, são as especificações de vizinhança, o parâmetro de poder (power) “p” e o fator de anisotropia, se existir (JAKOB & YOUNG, 2006)

O interpolador IDW foi usado neste trabalho para 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 partir dos valores do Índice de Hack.

4.4. Modelagem do terreno – Modelos Digitais de Elevação

Um Modelo Digital de Elevação é uma categoria da modelagem numérica do terreno. Um modelo numérico do terreno MNT (em inglês, DTM = Digital Terrain Model) é uma representação matemática da distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real, através de softwares e algoritmos específicos. A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado. Ou seja, o modelo pode representar tanto a variável altitude como qualquer outra que se apresente distribuída no espaço (BARROS, 2006).

Os modelos numéricos de terreno podem ser armazenados em *grades regulares* (representação matricial), *grades triangulares* (representação vetorial com topologia *arco-nó*) ou *isolinhas* (representação vetorial sem topologia). A partir deles, podem-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais.

Comumente associados à altimetria, também podem ser utilizados para modelar unidades geológicas, como teor de minerais, ou propriedades do solo ou subsolo, como aeromagnetismo. (FELGUEIRAS, 2001)

Dependendo do objetivo da aplicação da modelagem, bem como da natureza da variável espacial, tem-se as seguintes distinções, de acordo com Fonseca (2010):

- MDT/ DTM: refere-se ao terreno puro sem qualquer cobertura;
- MDS/ DSM (Modelo Digital de Superfície): refere-se à superfície do terreno, com a cobertura de vegetação, edifícios, etc.
- MDE/ DEM ou MNT: refere-se a qualquer variável espacial contínua, por exemplo, a altimetria do terreno.

O surgimento do MDE acompanhou o surgimento e aperfeiçoamento dos Sistemas de Informação Geográfica e possibilitou agilidade nos estudos de análise de bacias hidrográficas, pois tradicionalmente, os atributos das bacias de drenagem são obtidos manualmente a partir de mapas e trabalhos de campo. Além disso, possibilitou uma maior precisão na delimitação das bacias e sub-bacias de drenagem.

Por outro lado, a delimitação de bacias de drenagem utilizando métodos automatizados exige o emprego de um MDE que descreva de forma mais fidedigna possível a estrutura da rede de drenagem da bacia. Para tanto, métodos de interpolação e procedimentos para correção de erros são utilizados. Os trabalhos de campo também são importantes para verificar a existência *in loco* das drenagens extraídas. Nesta monografia, o MDE foi utilizado para obter a declividade e, em seguida, o ICR.

4.5. Classificação de imagens

As técnicas de classificação digital (ou automática) de imagens surgiram com a técnica da fotointerpretação (classificação não automática) na qual critérios são estabelecidos para a análise dos elementos que compõem a paisagem, utilizando-se das propriedades da cor, tonalidade, textura, estrutura, sombras, forma (ou padrão), que são específicas de cada alvo.

A classificação automática consiste na extração de informação em imagens para reconhecer padrões e temas homogêneos com o objetivo de mapear os tipos de cobertura da superfície terrestre. Esta técnica elimina a subjetividade da interpretação humana através dos algoritmos de classificação (ou classificadores), reduzindo o esforço de trabalho do analista. O resultado final da classificação é uma imagem digital que constitui em um mapa de pixels classificados, representando em polígonos os padrões homogêneos de classes de alvos – mapa digital temático (MENESES E ALMEIDA, 2012).

Os métodos de classificação podem ser divididos nos seguintes tipos: classificação paramétrica e não-paramétrica, classificação espectral e espacial, classificação supervisionada ou não-supervisionada e classificação por pixel ou por regiões.

Ao contrário da classificação não-supervisionada, a classificação supervisionada requer conhecimentos prévios das classes de alvos. O algoritmo necessita ser treinado para poder distinguir as classes uma das outras, sendo controlado de perto pelo analista. Este escolhe pequenas áreas de amostras na imagem, contendo poucas centenas de pixels que sejam bem representativo, espectralmente, de padrões ou feições dos alvos por ele reconhecidos, ou que podem ser identificados com a ajuda de outras fontes, tais como dados coletados no campo ou de mapa (MENESES E ALMEIDA, 2012).

A Tabela 2 apresenta, esquematicamente, os métodos de classificação e os respectivos algoritmos classificadores:

Tabela 2 – Tipos de classificação automática de imagens e classificadores (algoritmos)

Classificadores	Classificação pixel a pixel		Classificação por regiões
	Não supervisionada	Supervisionada	Segmentação de imagens (Não supervisionada)
Isodata	Paralelepípedo	Isoseg	
K-médias	Distância Mínima	Isodata	
	Máxima Verossimilhança	Bhattacharayya	
	Distância Mahalanobis	Clatex	

Fonte: Meneses e Almeida, 2012.

A maioria dos classificadores executa a classificação por pixel, que se utiliza somente da informação espectral de cada pixel para encontrar regiões homogêneas, a partir de medidas de distâncias ou de probabilidades de um pixel pertencer a uma classe específica. Na classificação por regiões o processo de decisão leva em consideração um agrupamento de pixels que é usado como unidade de classificação (MENESES E ALMEIDA, 2012).

O classificador Máxima Verossimilhança (Max-Ver), utilizado nesta monografia, 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 mais 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 E ALMEIDA, 2012).

Uma ferramenta estatística de se avaliar os modelos de classificação é a matriz de confusão ou de classificação. 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.

O limiar de decisão indica a porcentagem de pixels da distribuição de probabilidade de uma classe que será classificada como pertencente a esta classe. Um limite de 99% indica que 1%

serão ignorados (os de menor probabilidade). Um limiar de 100% resultará em uma imagem totalmente classificada sem rejeição, ou seja, todos os pixels serão classificados.

4.6. Análise de Multicritério e Álgebra de mapas

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. A matemática empregada 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, rasters ou imagens, conforme variáveis consideradas, que produzem novos resultados para análise e síntese da informação.

5. METODOLOGIA

De maneira geral, este trabalho pode ser dividido em cinco etapas metodológicas: preparação das bases e mapas de apoio; cálculo dos parâmetros morfométricos; procedimentos geoestatísticos, análise morfométrica e análise de multicritérios. Os materiais e procedimentos metodológicos a serem utilizados neste trabalho estão descritos a seguir:

a) Bases cartográficas: Para as drenagens e para a delimitação da bacia do rio Santa Bárbara foram utilizadas as bases cartográficas em *shape file* do IBGE atualizadas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM); para o mapa geológico foram utilizadas as bases da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM), referentes à carta geológica do Brasil ao Milionésimo (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).

b) Cenas da imagem LANDSAT-8: Duas cenas da imagem LANDSAT-8 da área de estudo, composição falsa cor 654RGB, datadas de maio/2013, foram utilizadas para a classificação de imagens e para a posterior elaboração do mapa de uso e cobertura do solo. A plataforma LANDSAT-8, lançada em fevereiro/2013, opera com dois instrumentos imageadores: *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIR) cujas características estão descritas na Tabela 3:

Tabela 3 – Características espectrais dos instrumentos imageadores LANDSAT-8

LANDSAT-8 Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 – Coastal aerosol	0.43 – 0.45	30
Band 2 – Blue	0.45 – 0.51	30
Band 3 – Green	0.53 – 0.59	30
Band 4 – Red	0.64 – 0.67	30
Band 5 – Near Infrared (NIR)	0.85 – 0.88	30
Band 6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
Band 7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
Band 8 – Panchromatic	0.50 – 0.68	15
Band 9 – Cirrus	1.36 – 1.38	30
Band 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100
Band 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

Fonte: Sítio eletrônico do Serviço Geológico Estadunidense (USGS), 2013.

A Figura 7 apresenta o aspecto da área de estudo nas duas cenas da imagem LANDSAT, na referida composição colorida falsa cor, com aplicação de contraste no histograma da imagem.



Figura 7 – Imagem da bacia do rio Santa Bárbara na composição colorida 654RGB-LANDSAT 8, maio/2013, em ambiente do software SPRING. 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).

Elaboração: Sandra Deodoro.

c) 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. Escolheu-se este classificador por este permitir a escolha de regiões homogêneas, considerando-se a heterogeneidade da paisagem e do relevo movimentado da área de estudo.

As chaves de interpretação utilizadas para as áreas de treinamento foram *água, vegetação arbórea-arbustiva, vegetação herbácea, área urbana, eucalipto, solo exposto, mineração e*

afloramento rochoso. Estas chaves são compatíveis com o contexto da paisagem da área bacia do rio Santa Bárbara pela sua ocorrência.

Os elementos de fotointerpretação utilizados para compor as chaves de interpretação e caracterizar os diferentes usos analisados nas imagens foram *tamanho, forma, cor (matiz), tonalidade e textura*.

- Água (corpos d'água): Representada pelos alvos de textura lisa, tonalidade escura a média com matiz (cor) azul. Apresenta forma tanto linear como orgânica (poligonal), pois se associa tanto a cursos d'água como lagoas, inclusive os espelhos d'água formados nas cavas de mineração. Nas relações de contexto, podem ocorrer no entorno dos fragmentos florestais, nos fundos de vale, nas áreas de mineração ou em área urbana. Neste trabalho, como destaque, está a represa de Peti (da CEMIG).

- Vegetação arbórea-arbustiva: A cor ou matiz dos alvos representados por vegetação arbórea apresenta-se verde escuro. A textura é mais rugosa em relação à cobertura de eucalipto. Difere-se da vegetação da rasteira e do eucalipto pela tonalidade e textura. Quanto à sua posição na paisagem, referindo-se a relação de contexto, ocorre entremeada às plantações de eucalipto e algumas áreas de mineração. Pode ocorrer, ainda, nas encostas das vertentes, próximo aos cursos d'água e, também, em área urbana sob forma de fragmento florestal. Apresenta, portanto, forma irregular e ausência de estrutura.

- Vegetação rasteira: Na imagem, difere-se da vegetação arbórea-arbustiva, principalmente, pelas características texturais, sendo esta mais lisa, e pela cor e tonalidade, representadas por verde mais claro. Nas relações contexto, apresentam-se como pequenas manchas descontínuas, tanto em áreas urbanas como junto a corpos d'água. Em função da resolução espacial da imagem, foi associada, ainda, às áreas dos campos de altitude da serra do Caraça.

- Eucalipto: A cor ou matiz dos alvos representados por eucalipto apresenta-se verde claro de alta intensidade e de textura lisa. Quanto à sua posição na paisagem, pode ocorrer, nas encostas e topo das vertentes e próximo aos cursos d'água. Referente à relação de contexto, ocorre entremeada tanto à vegetação arbóreo-arbustiva como à vegetação rasteira, e também,

à solo exposto. Sua ocorrência é mais visível no entorno de parte da represa de Peti, e na região dos municípios de Barão de Cocais, Santa Bárbara e São Gonçalo do Rio Abaixo. Apresenta forma regular e estrutura.

- Área urbana: As chaves marcantes deste alvo são a forma regular representada pelas edificações, quarteirões e sistema viário, e a matiz roxa de tonalidades claro a médio. Manchas isoladas de vegetação arbustiva podem ocorrer pontualmente. Neste trabalho, a amostra referente às áreas urbanas correspondem às sedes e alguns distritos e povoados dos municípios de Santa Bárbara e Barão de Cocais, principalmente.

- Solo exposto: Os alvos representados por solo exposto podem ocorrer, nesta imagem, pela cor ou matiz rosa a branco e textura lisa, tanto em área urbana como em área de mineração. Neste estudo, atribuíram-lhes às estradas não pavimentadas, às feições erosivas, a alguns taludes em cavas de mineração e às vertentes desprovidas de cobertura vegetal. Pode ocorrer, ainda, em alguns pontos em áreas de afloramento rochoso devido à resposta espectral de alguns minerais e da granulometria de alguns constituintes, por exemplo, na fração areia.

- Mineração: As áreas de mineração apresentam-se com cor (matiz) roxa, de tonalidade clara e escura. Apresentam forma irregular e associam-se ou não às cavas com espelho d'água. A amostra de treinamento desta chave de interpretação está identificada, neste trabalho, pelas cavas de mineração das minas Córrego do Sítio, Gongo Soco e Brucutu, principalmente.

- Afloramento rochoso: Associado à serra do Caraça, nesta imagem, apresenta matiz rosa escuro gradando ao magenta em algumas porções, textura rugosa, forma irregular e ausência de estrutura. Pode-se associar, também, a alguns taludes em cavas de mineração.

A Tabela 4 apresenta os elementos de interpretação da imagem LANDSAT-8.

Tabela 4 - Elementos de interpretação da imagem LANDSAT-8 (654RGB) – Bacia do rio Santa Bárbara

Elementos de interpretação																
Chave	Tonalidade			Matiz	Saturação			Elemento de textura	Textura			Forma		Estrutura	Aspectos associados	Relação de Contexto
	-	++	+		-	++	+		fina	média	grossa	reg.	irreg.			
Água			X	Azul escuro	X			lisa	X				X	orgânica	lagoas, represa, rio	Represa de Peti; Rio Santa Bárbara; barragem de rejeitos de mineração
Vegetação arbóreo-arbustiva			X	Verde escuro	X			rugosa			X		X	orgânica	fragmento florestal	Fragmento no entorno da represa de Peti e na porção centro-sul da bacia.
Eucalipto		X		Verde			X	lisa a pouco rugosa		X		X		indefinida	áreas de reflorestamento	Adjacente a fragmentos florestais, solo exposto e entorno da represa de Peti.
Vegetação rasteira	X			Verde claro		X		lisa	X				X	indefinida	gramínea, campos rupestres	Serra do Caraça e próximo as áreas urbanas.
Urbano		X		Roxo a azul claro		X		rugosa		X		X		ortogonal	Vias e edificações	Sedes e distritos de Santa Bárbara e Barão de Cocais.
Solo exposto	X			Branco a rosa claro			X	lisa	X				X	indefinida	Vias de acesso não pav.; áreas de mineração e de reflorestamento	Encostas e topos das vertentes; cavas de mineração, entorno de eucaliptos.
Mineração			X	Roxo a azul claro			X	rugosa			X	X		indefinida	Cava; barragem de rejeitos sem água	Minas Gongo Soco, Brucutu e Córrego do Sítio
Afloramento rochoso			X	Rosa a magenta			X	rugosa		X			X	indefinida	elevação do terreno	Serra do Caraça

Elaboração: Sandra Cristina Deodoro

d) Escolha e cálculo dos parâmetros morfométricos. Os parâmetros utilizados relacionam-se ao relevo e as redes de drenagem, e servem de base para as análises linear, areal (ou zonal) e hipsométrica da bacia. A escolha dos fatores levaram em consideração a possibilidade de relacionar o vigor energético da bacia e o relevo e verificar as áreas de potencialidade natural à erosão. Desta forma, os parâmetros trabalhados são o Índice de Hack (IH) e o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR), cujas fórmulas e descrições estão apresentadas a seguir:

- Índice de Hack: Refere-se à relação entre o comprimento do rio principal e a área da bacia, proposta por Hack em 1957 e 1973, em perfis longitudinais de rios, denominada de *Stream Length-Gradient Index* (SL Index). No Brasil ela é também conhecida como Relação Declividade-Extensão (RDE) e consiste na seguinte fórmula:

$$SL = (h/l) * L$$

- Índice de Rugosidade (Ir): Corresponde a um dos aspectos da análise dimensional da topografia, cujo resultado é um número adimensional do produto entre a amplitude altimétrica (H) e a densidade de drenagem (Dd), conforme a seguinte fórmula:

$$Ir = H * Dd,$$

onde H => amplitude altimétrica e Dd => densidade de drenagem.

Os resultados da espacialização dos Índices de Hack e de Concentração da Rugosidade foram utilizados para comparar com aqueles obtidos na álgebra de mapas e análise multicriterial para o mapa de potencialidade erosiva da bacia do rio Santa Bárbara.

e) Tratamentos geoestatísticos: uso do interpolador IDW para identificar zonas drenadas por cursos de água com o mesmo vigor energético, a partir dos valores do Índice de Hack; e uso do estimador de densidade de Kernel a partir dos valores (pontos) de declividade para obter o ICR. Para o IDW, aplicaram-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.

f) Análise de Multicritério. Para a atribuição de pesos dos temas da análise de multicritério para a elaboração do mapa de suscetibilidade a erosão do solo, baseou-se 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 5 apresenta a contribuição (%) de cada tema (Geologia, Pedologia, Declividade e Uso e Cobertura do Solo).

Tabela 5 – Ponderação (%) de cada tema das variáveis

TEMA	PESO (%)
Geologia (Litotipos)	25
Pedologia	20
Declividade	20
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 seguintes apresentam as notas das variáveis de cada tema, sendo que os maiores valores indicam menor contribuição à instabilidade do relevo e à potencialidade à erosão.

As Tabelas 6 a 9 apresentam as notas contribuintes das variáveis relacionadas a Pedologia, a Geologia, a Declividade e ao Uso e Cobertura do Solo.

Tabela 6 – Notas das variáveis relacionadas à Pedologia

TEMA	ATRIBUTO	NOTA
Pedologia	AFLORAMENTO ROCHOSO	8
	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	6
	LATOSSOLO VERMELHO	9
	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	9
	CAMBISSOLO HÁPLICO	1
	NEOSSOLO LITÓLICO	7

Fonte: Crepani *et al*, 2001. Adaptado

Tabela 7 – Notas das variáveis relacionadas à Geologia

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

Fonte: Parizzi *et al*, 2010.

Tabela 8 – Notas das variáveis relacionadas à Declividade

TEMA	ATRIBUTO (graus)	NOTA
Declividade	0 – 5	9
	5 – 10	7
	10 – 30	5
	30 – 45	3
	> 45	2

Tabela 9 – Notas das variáveis relacionadas ao Uso e Cobertura do Solo

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

Fonte: Gonçalves *et al*, 2011. Adaptado.

g) 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 8 apresenta, graficamente, um resumo dos procedimentos metodológicos no SIG:

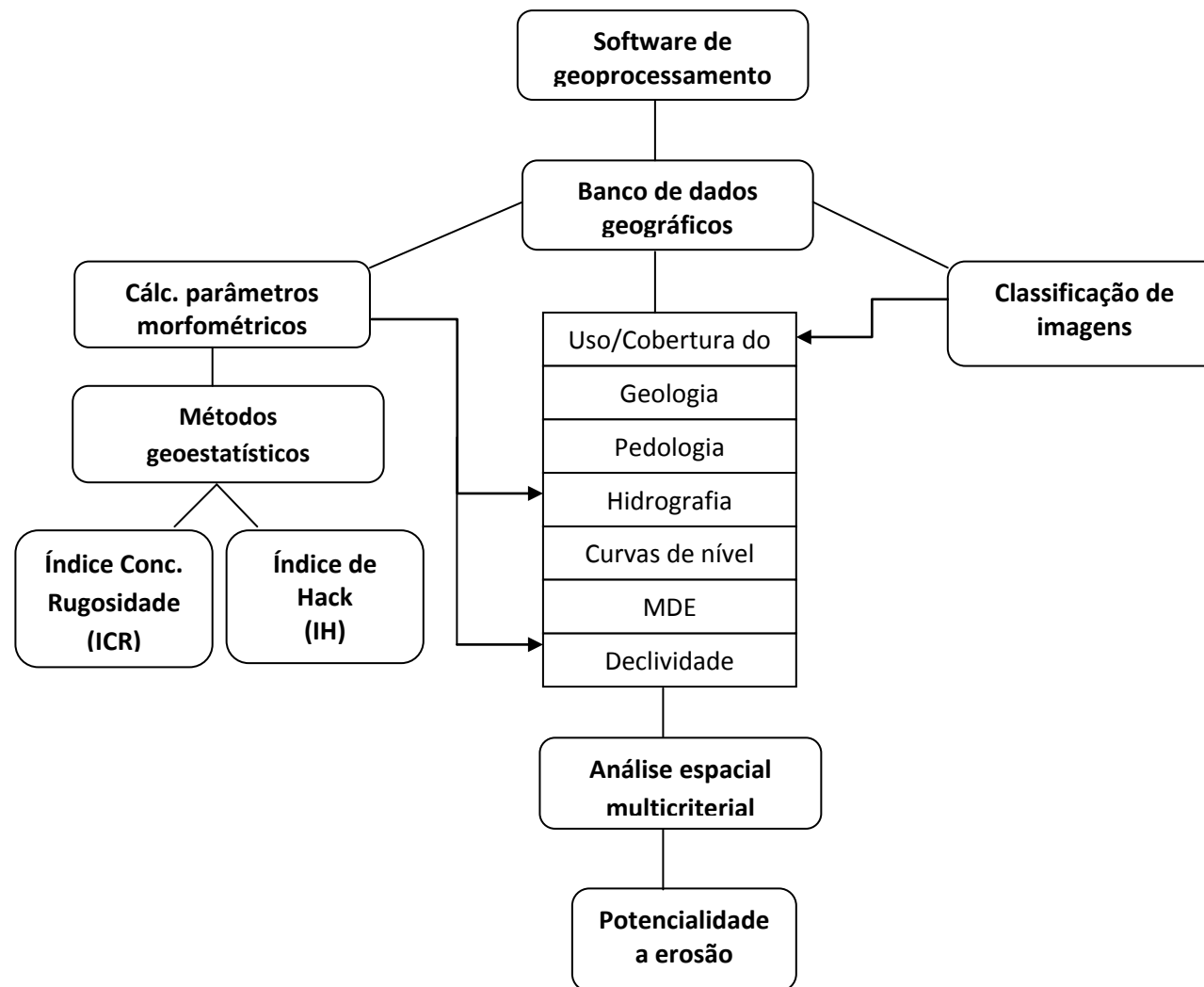


Figura 8 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

6.1. Classificação supervisionada – Mapa de uso e cobertura do solo

O desempenho médio da classificação foi de 95,10% (Tabela 10) 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 10 – Resumo do desempenho da classificação – Método Max-Ver

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 %

A Figura 9 apresenta o resultado da classificação automática supervisionada por 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 regiões da bacia.

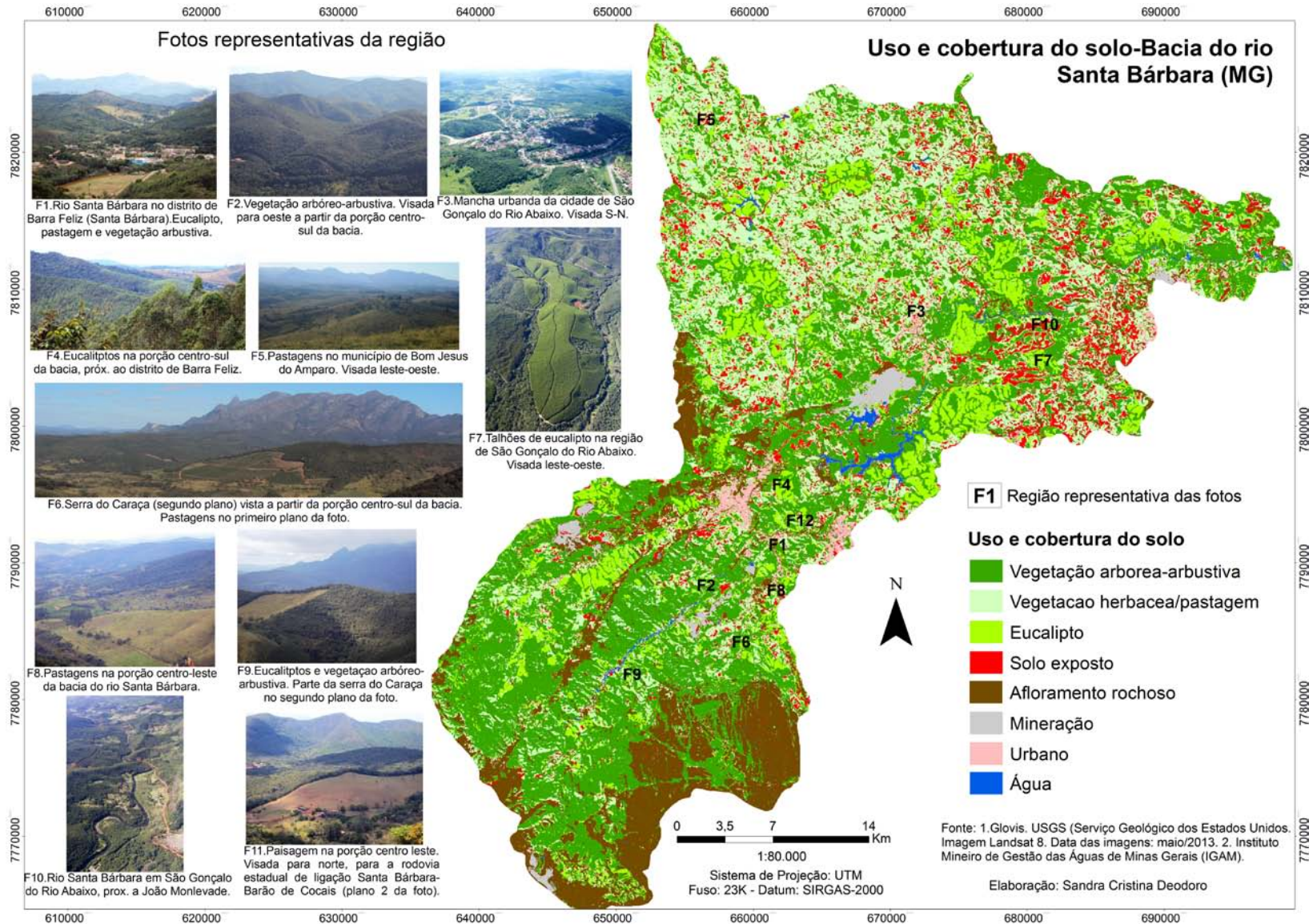


Figura 9 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo da bacia do rio Santa Bárbara.

O resultado é condizente com a área de estudo e, pode-se dizer, a imagem LANDSAT e o classificador utilizados foram suficientes para representar as características de uso e cobertura do solo da bacia do rio Santa Bárbara, pela escala de análise.

Em função da resolução espacial da imagem (30m) não foi possível detalhar ou discriminar melhor os tipos de cobertura vegetal densa e herbácea. 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.

6.2. Parâmetros morfométricos

✓ Espacialização do Índice de Hack

O cálculo do Índice de Hack resultou em uma malha densa de pontos cujos valores (índices) obtidos variaram entre 0,00201 (menor valor) e 130,161 (maior valor) indicando diferenças energéticas (relevo-drenagem) em diversos trechos da bacia bem como anomalias nos canais e drenagem, como o próprio Hack (1973) observou em seus estudos – que o resultado relaciona-se diretamente à competência de um rio e que, por sua vez, pode-se dizer, à energia do mesmo.

Desta análise pontual do Índice de Hack, tem-se a análise zonal através da aplicação do interpolador IDW. Este procedimento geoestatístico permitiu espacializar este Índice e obter os valores em classes sendo que o fatiamento por quantil foi o que apresentou resultado mais consistente com a área da bacia do rio Santa Bárbara.

A Figura 10 apresenta o resultado do Índice de Hack com a interpolação pelo IDW.

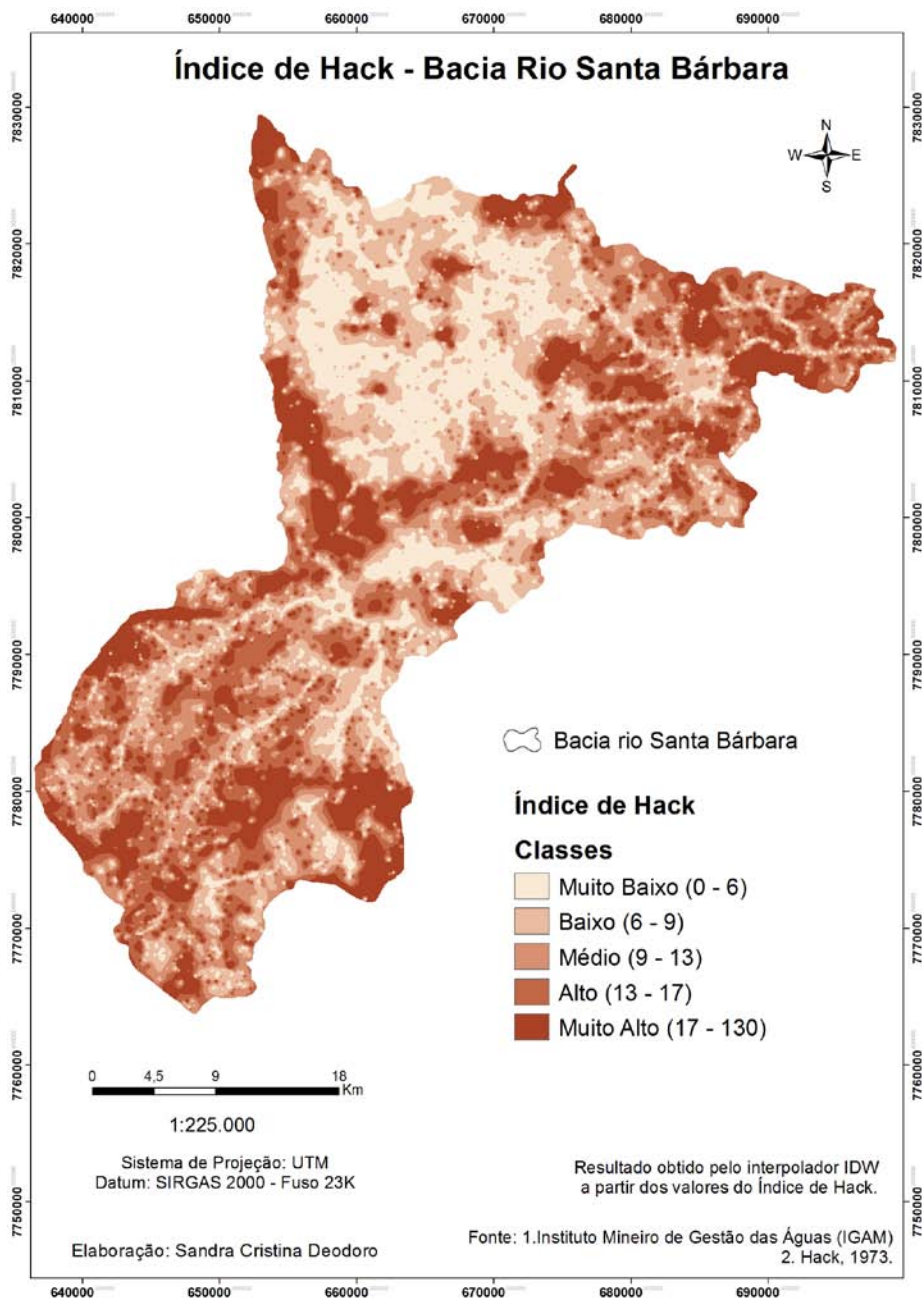


Figura 10 – Mapa de espacialização do Índice de Hack da bacia do rio Santa Bárbara.

O resultado da espacialização do Índice de Hack assemelha-se com a distribuição da rede de drenagem, coincidente com os valores muito baixos (de tonalidade mais clara) representados sob aspecto linear.

A concentração dos valores muito baixo e baixo na porção norte da bacia ocorrem nas áreas de menor declividade (0° a 10°), de relevo menos rugoso e de média potencialidade a erosão, conforme pode ser observado nas Figuras 11 e 12 nos próximos itens.

As cores mais escuras indicam as áreas de maior vigor energético da bacia coincidindo com as mais elevadas e declivosas e com os afloramentos rochosos. A correspondência destes valores com a localização dos reservatórios de Peti (CEMIG) e PCH São Gonçalo indicam, ainda, o potencial hidroenergético da bacia (Figura 10a).

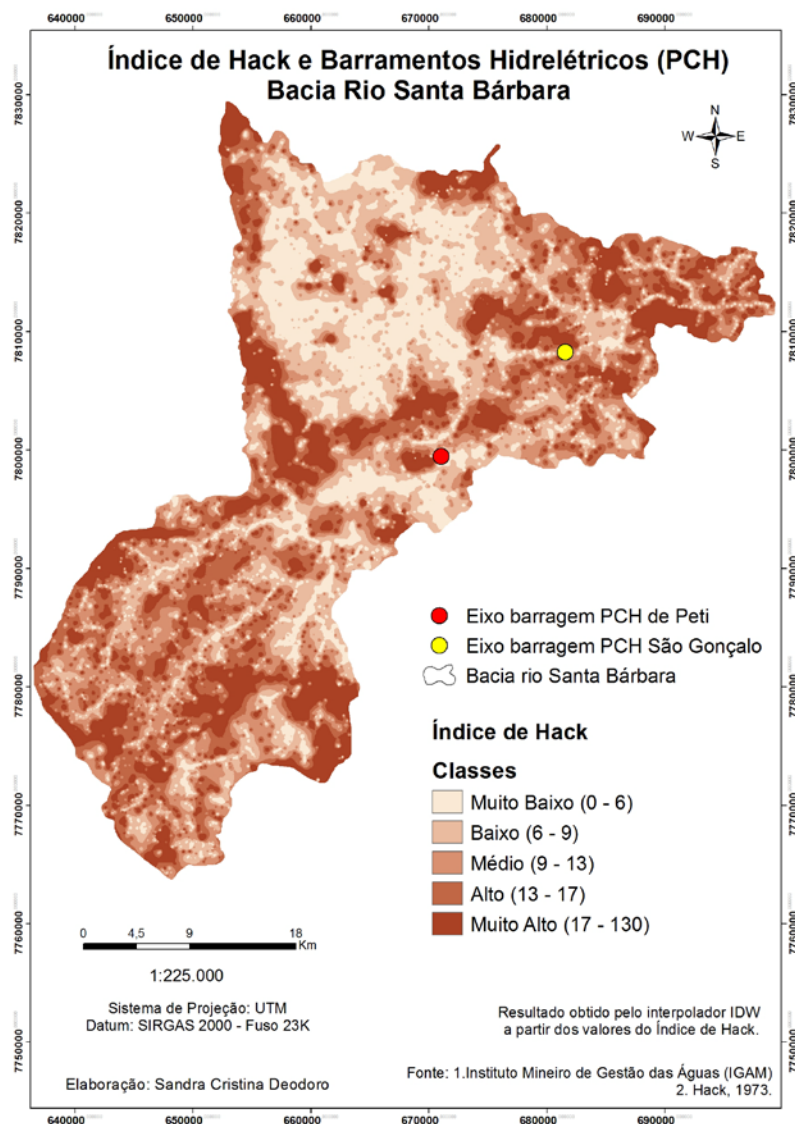


Figura 10a – Mapa do Índice de Hack e Barramentos Hidrelétricos na bacia do rio Santa Bárbara.

✓ **Espacialização do Índice de Concentração de Rugosidade do Relevo**

O Índice de Concentração de Rugosidade do Relevo representa a espacialização dos valores da declividade a partir da aplicação do estimador de densidade de Kernel. O resultado obtido mostra que as porções centro-sul e extremidade nordeste da bacia apresentam os maiores valores (alto e muito alto) indicando que são as regiões de relevo mais dissecado da bacia. Tais porções correspondem às áreas onde concentram as unidades de conservação (Figura 3), 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 nas porções centro-norte e centro-leste. Na primeira, relacionam-se às áreas de litologia mais uniforme, com prodomínio das menores declividades (0° a 10°) e do uso do solo representado por pastagens. Na segunda, coincide com a área da represa de Peti e entorno imediato.

As Figuras 11a e 11b apresentam, respectivamente, o Mapa de Declividade e o Mapa do Índice de Concentração de Rugosidade do Relevo com representação em classes. Conforme se pode observar, a espacialização deste Índice apresenta semelhança com o resultado da espacialização do Índice de Hack.

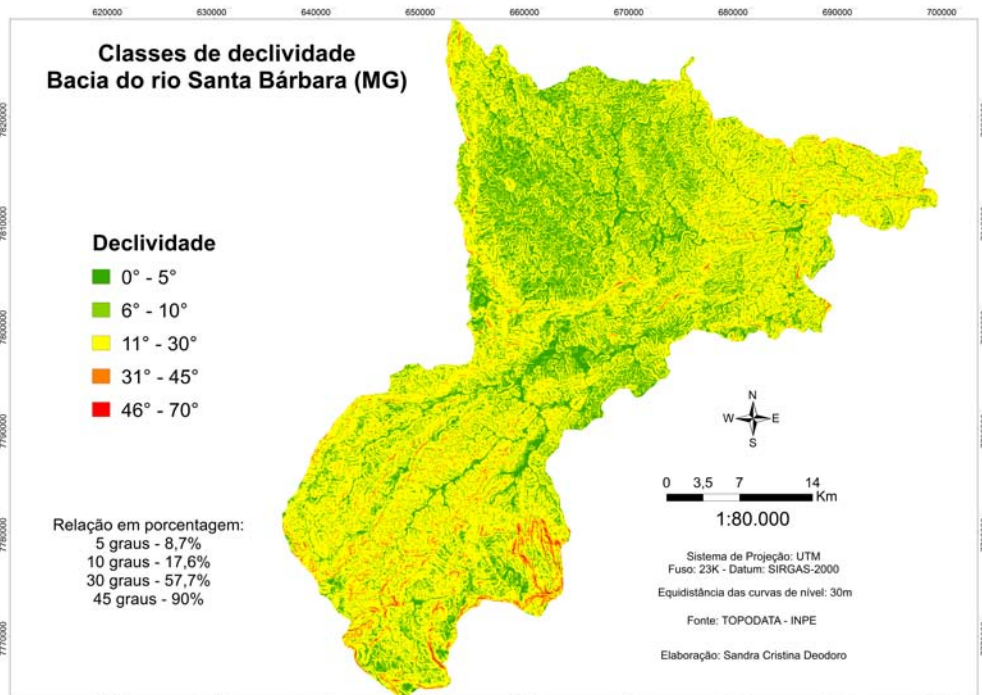


Figura 11.a – Mapa de Declividade da bacia do rio Santa Bárbara.

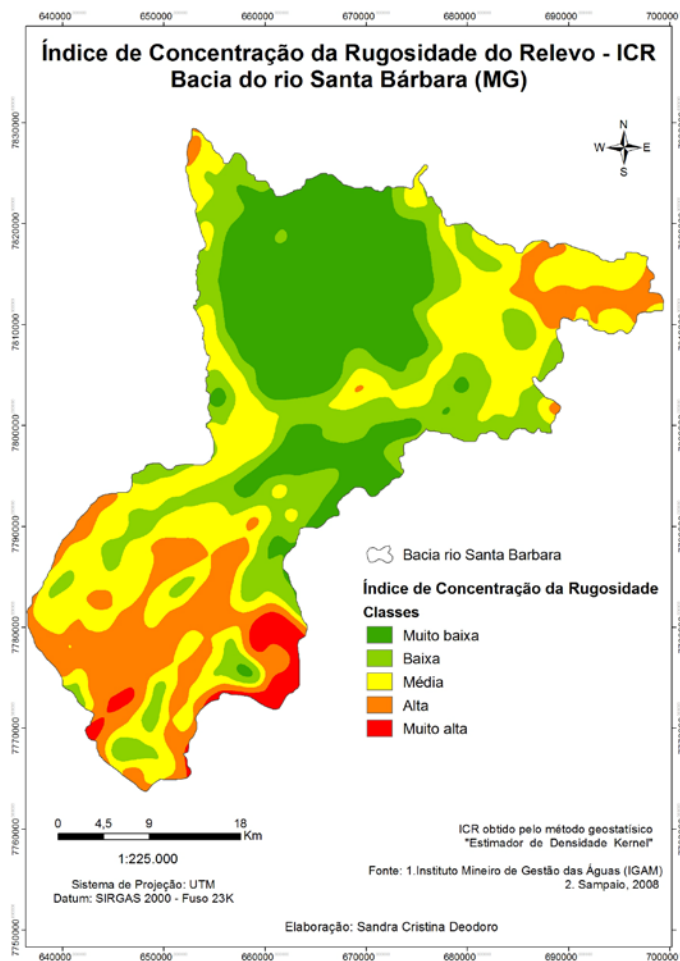


Figura 11.b – Mapa do ICR da bacia do rio Santa Bárbara.

6.3. Álgebra de mapas e Análise de multicritério

As operações de álgebra de mapas resultaram no mapa de Potencialidade à Erosão 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 que receberam as notas mais favoráveis à potencialidade a erosão tais como as áreas de ocorrência de Cambissolo, de heterogeneidade geológica (xisto, arenito, metapelito, quartzito e filito ferruginoso, por exemplo), de declividade acima de 30°, de solo exposto, de mineração e de pastagem.

À exceção do tema “Uso e Cobertura do Solo”, os demais temas receberam pesos equivalentes, por considerar que aquele é um agente acelerador de mudanças no meio físico. A Figura 12 apresenta o Mapa de Potencialidade à Erosão da bacia do rio Santa Bárbara.

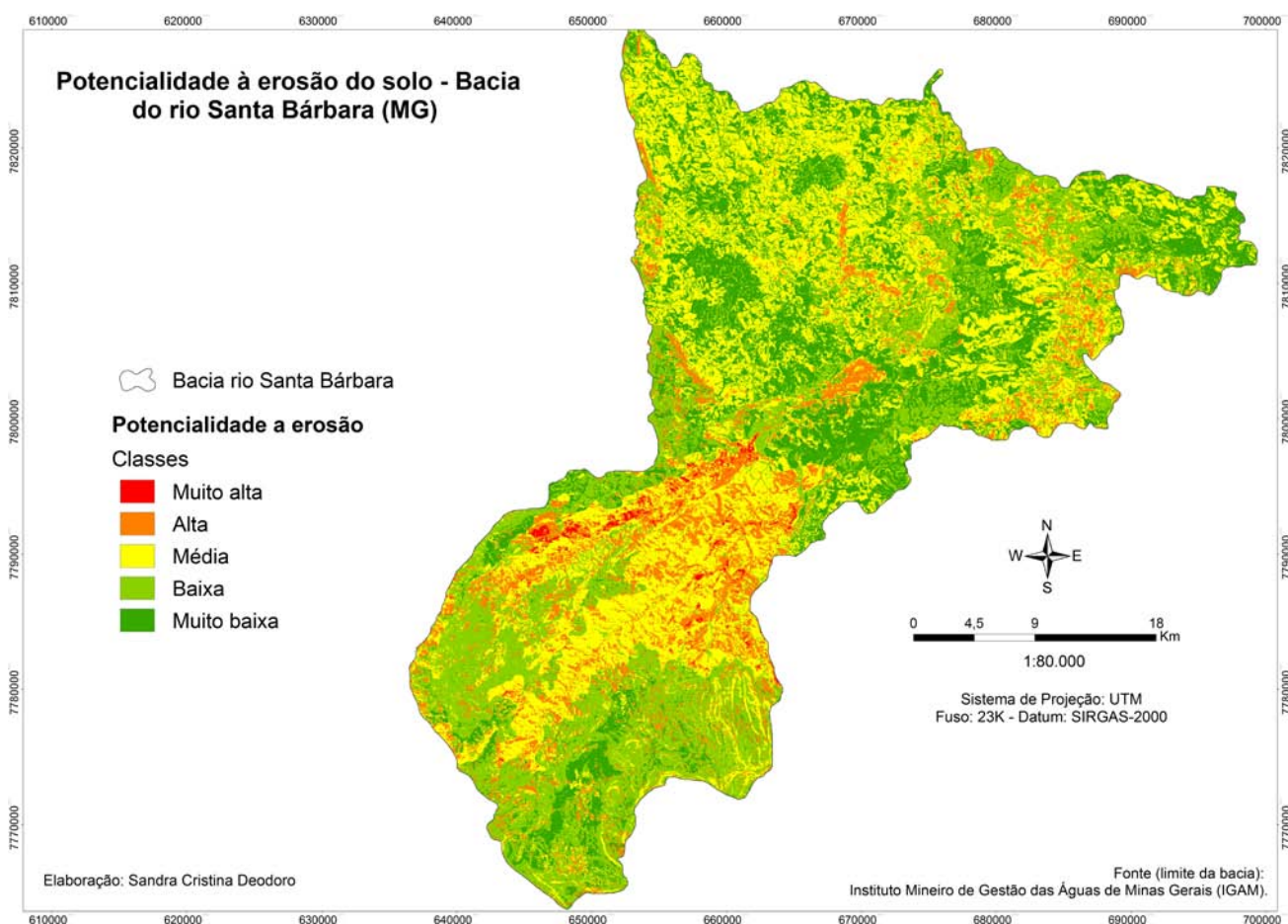


Figura 12 – Mapa de Potencialidade à Erosão da bacia do rio Santa Bárbara

O resultado desta análise multicriterial assemelha-se com o resultado do Índice de Hack na porção centro-norte da bacia e, com o ICR, na porção centro-sul. Ressalta-se que apenas a declividade é a variável em comum entre estes três produtos finais utilizada na álgebra de mapas.

7. CONCLUSÕES

Baseado em conhecimentos prévios da área de estudo, pode-se dizer que os resultados obtidos foram consistentes, afirmando a eficácia das técnicas e ferramentas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto na compreensão das características e elementos que compõem o espaço geográfico (natural ou antropizado). Afirma, ainda, a importância destes conhecimentos prévios para a tomada de decisão a cerca das diversas operações disponibilizadas pelos Sistemas de Informação Geográfica.

As cenas da imagem LANDSAT 8 são úteis nos estudos 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 unidades de paisagem predominantes e os conflitos de uso, correspondentes a porção centro-sul, com maior tendência à preservação, e a porção centro-norte, com tendência à ocupação, já apresentando um certo grau de antropização.

A partir dos Índices de Hack (IH), de Concentração da Rugosidade do Relevo (ICR) e da análise da declividade, foi possível conhecer algumas características zonais, lineares e hipsométricas da bacia do rio Santa Bárbara, bem como os pontos de energia da bacia e de potencialidade à erosão, apresentados no item dos Resultados. De maneira geral, pode-se dizer que parte da porção centro-norte apresenta os menores valores de declividade, de IH, de ICR e de potencialidade a erosão (muito baixa a média) e que a bacia do rio Santa Bárbara apresenta vigor energético alto a muito alto na maior parte de sua área.

As análises morfométrica e multicriterial, apoiadas em procedimentos geostatísticos, constituem em ferramentas eficazes nos trabalhos de planejamento e gestão territorial/ambiental, principalmente se realizadas de forma interrelacionada. Além disso, a

oportunidade de se utilizar imagem de satélite atual, recém lançada, contribuiu muito para a agilidade dos procedimentos e obtenção de resultados compatíveis com a realidade.

Cabe ressaltar que a análise ambiental de uma bacia hidrográfica deve ser feita através de uma abordagem sistêmica, transcendendo as análises químicas de qualidade das águas, muitas vezes realizadas de maneira fragmentada e sem correlação com outras variáveis ambientais. Neste sentido, as técnicas de modelagem de dados espaciais ambientais utilizadas neste trabalho possuem um grande potencial e devem ser associadas as, não menos importantes, análises químicas de qualidade das águas.

8. REFERÊNCIAS

BARROS, R. S. (2006). **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação obtidos através de sensores orbitais. 2006. Tese (Doutorado)** - Programa de pós-graduação em Geografia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. (2009). 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, 2009.

CHEREM, L. F. (2008). **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. (1980). **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).** Maceió-Alagoas. 27 de novembro a 01 de dezembro de 2011.

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. São Jose dos Campos, 2011.

FARIA, A. L. L.; SILVA, J. X.; GOES, M. H. de B. (2003). 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**. Inpe, São José dos Campos, 2001.
FONSECA, B. M. (2010). **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.

FREIRE, A. J.; LAGE, G. B.; CHRISTÓFARO, C. (2013). 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.

GLOBAL VISUALIZATION VIEWER (GLOVIS). UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Disponível em <http://glovis.usgs.gov/> Acesso em 03 de agosto 2013

GONÇALVES, G. G. G.; DANIEL, O.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A. C. T.; ARAI, F. K. (2011). 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. (1957). **Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland**. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap. 294- (1957), pp. 45-97.

_____. (1973). **Stream-profile analysis and stream-gradient index**: U. S. Geol. Survey Jour. Research, v. 1, n° 4, p. 421-429

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) - **Manuais: tutorial de geoprocessamento**. SPRING. 2008.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. (2006). **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais. ABEP. Caxambu – MG – Brasil. 18 a 22 de setembro de 2006.

MENESES, P. R; ALMEIDA, T. (orgs.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

MESSIAS, C. G.; TROVÓ, D. F. G. (2013). **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 (2003). **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte, Ed da Autora, 2003.

_____ (2007). **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.

_____ (2009). **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 setembro 2009, FEA/USP.

PARIZZI, M. G.; MOURA, A. C. M.; MEMORIA, E. MAGALHÃES, D. M. (2010). 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.

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

SALLES, M. M. (2010). **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

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.

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**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife-PE. 27 a 30 de julho de 2010.