

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Alcione Rodrigues Milagres

**ANÁLISE DA DINÂMICA ENERGÉTICA DE BACIAS DE DRENAGEM EM
ÁREA DE ROCHAS SILICICLÁSTICAS, NA SERRA DO ESPINHAÇO
MERIDIONAL, COM A UTILIZAÇÃO DO ÍNDICE DE HACK**

Dissertação: Geografia

Belo Horizonte
2016

Alcione Rodrigues Milagres

**ANÁLISE DA DINÂMICA ENERGÉTICA DE BACIAS DE DRENAGEM EM
ÁREA DE ROCHAS SILICICLÁSTICAS, NA SERRA DO ESPINHAÇO
MERIDIONAL, COM A UTILIZAÇÃO DO ÍNDICE DE HACK**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Geografia e Análise Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin.

Co-orientador: Prof. Dr. Bráulio Magalhães Fonseca.

Belo Horizonte
2016

M637a Milagres, Alcione Rodrigues.
2016 Análise da dinâmica energética de bacias de drenagem em área de rochas siliciclásticas, na Serra do Espinhaço Meridional, com a utilização do índice de Hack [manuscrito] / Alcione Rodrigues Milagres. – 2016.
98 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin.
Coorientador: Bráulio Magalhães Fonseca.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2016.
Área de concentração: Geografia e Análise Ambiental.
Inclui bibliografias.

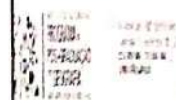
1. Bacias hidrográficas – Espinhaço, Serra do (MG e BA) – Teses.
2. Rochas – Teses. 3. Sistemas de informação geográfica – Teses. I. Augustin, Cristina Helena Ribeiro Rocha. II. Fonseca, Bráulio Magalhães. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 556.51(813.8 + 815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA




FOLHA DE APROVAÇÃO

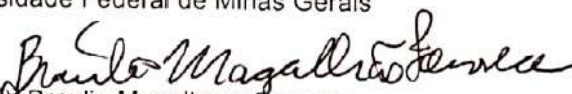
Análise da dinâmica energética de bacias de drenagem em área de rochas siliciclásticas, na Serra do Espinhaço Meridional, com a utilização do índice de Hack

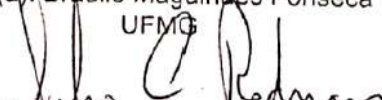
ALCIONE RODRIGUES MILAGRES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOGRAFIA, área de concentração ANÁLISE AMBIENTAL.

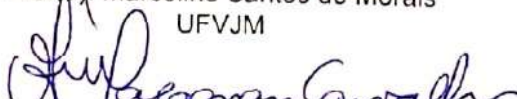
Aprovada em 20 de maio de 2016, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Cristina Helena R Rocha Augustin Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais


Prof(a). Bráulio Magalhães Fonseca
UFMG


Prof(a). Silvio Carlos Rodrigues
UFU


Prof(a). Marcelino Santos de Moraes
UFVJM


Prof(a). Vilma Lucia Macagnan Carvalho
UFMG

Belo Horizonte, 20 de maio de 2016.

*A Sebastião Milagres, Amélia Ladeira Rodrigues
e Alcides Milagres pela confiança e amor*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão que sempre primaram pela minha educação, que além de me oferecerem a oportunidade de estudar sempre estiveram presentes apoiando todas as minhas decisões.

A toda a minha família, tios, tias e primos pelo apoio emocional e o incentivo as minhas decisões e escolhas acadêmicas.

A UFMG e principalmente ao IGC, seus professores e funcionários pelo acolhimento e oportunidade de aprender.

Agradeço a minha orientadora Prof. Dr. Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin, pelos grandes ensinamentos, incentivo a pesquisa, liberdade e confiança referente ao presente trabalho.

Agradeço também ao meu co-orientador prof. Dr. Bráulio Magalhães Fonseca pela paciência e auxílio no ArcGis, pelas discussões conceituais, além da indiscutível amizade e compreensão.

Agradeço ao Henrique e Mateus por todo o auxílio nos trabalhos de campo, pelas discussões teóricas, e principalmente pela grande amizade que extrapola as questões acadêmicas. A Mariana pelo incentivo e a disposição em sempre ajudar no que for preciso.

Agradeço ao Fernando, por todo auxílio no laboratório de Geomorfologia, e ao prof. Fábio pela boa vontade em ceder seu laboratório para minhas análises.

Agradeço a CAPES pelo auxílio financeiro concedido em todo o período do mestrado.

Agradeço a todos os professores que aceitaram prontamente o meu convite para participar da banca de defesa da dissertação.

RESUMO

As bacias hidrográficas do rio Pardo e Alto rio Jequitinhonha, estão entre as principais bacias da Serra do Espinhaço Meridional, são responsáveis pelo abastecimento de água e pela modelagem do relevo, de modo a criar ambientes distintos, mesmo em rochas siliciclásticas, os quais são percebidos nas formas de relevo. Buscando compreender as dinâmicas envolvidas nestes ambientes, o objetivo deste trabalho é comparar a dinâmica energética das porções das bacias Pardo e Alto Jequitinhonha, localizadas sobre o domínio das rochas siliciclásticas, do Supergrupo Espinhaço, MG. Para isso, foi utilizado o índice de Hack, além de outros parâmetros que contribuem para a compreensão destes relevos, auxiliados por trabalhos de campo e análises laboratoriais. Esta dissertação foi estruturada em dois capítulos (que correspondem a dois artigos) precedidos por um capítulo introdutório e sucedido por um capítulo de considerações finais. No capítulo 2 (artigo 1) foi realizada uma comparação entre o cálculo do índice de Hack utilizando unidades espaciais diferentes para o comprimento do rio, quais sejam o rio em sua totalidade e seus segmentos hierarquizados, para determinar qual método apresenta melhores respostas acerca da dinâmica energética de bacias, e assim ser utilizado com segurança para compreender as diferenças energéticas da área de estudo. No capítulo 3 (artigo 2) foi realizada uma análise da relação entre energia e competência dos rios destas mesmas bacias, e apresenta resultados sobre a eficiência da utilização do índice de Hack em área de clima tropical úmido. Os resultados evidenciam padrões de evolução diferenciados, entre as duas bacias. Validam o cálculo do índice de Hack através de segmentos de rios hierarquizados, os quais permitem perceber as variações energéticas em escala maior de detalhamento. Legitimam ainda o valor das medidas obtidas por este índice, validadas por observações e medidas de campo, indispensáveis para a compreensão dos dados, principalmente devido às peculiaridades locais de cada rio, como a forma, litoestrutura e processos envolvidos em sua dinâmica energética.

Palavras chave: Índice de Hack, Bacia Hidrográfica, Relação energia/competência.

ABSTRACT

The Pardo and High Jequitinhonha drainage basin are two of the most important basins of the Meridional Espinhaço Mountain Range. They are responsible for water supply and the landforms evolution, creating different environments, even those situated on siliciclastic rocks. Aiming to understand the environment dynamics, the main objective of this work is to compare the energetic dynamics of both drainage basin exclusively located on siliciclastic rocks from Espinhaço Supergroup, Minas Gerais. For this, the Stream-Gradient Index and other parameters were used, assisted by field work. This dissertation was organized in two chapters, preceded by one introductory chapter and at the end being presented the final remarks. In the second chapter (paper 1) the objective was to analyze the consistency of the methodological procedures and results using the full segment of a river and comparing them with the results obtained by the use of methodological procedures to the size of the segments of hierarchical drainage, seeking to obtain a better understanding of the specificities of this index, as well as determining which method provides better results about the energy dynamics of the basins. The third chapter (paper 2) provides an analyses about the relation between energy and competence in both drainage basin, besides presenting results on the efficiency of using the Stream-Gradient index in humid tropical environments. Results indicate different evolution patterns between the two basin, within the same lithological domain. They also validate the index calculation through segments of hierarchical drainage, which allows realizing the energy variations in more detail scales. Further, legitimizes the value of the measurements obtained by the index, and then validated in field. The field work was important for the understanding of the data, mainly due to local peculiarities of each river, form, litoestructure and process involved in their energy dynamics.

Keywords: Hack Index, Drainage Basin, Relation energy/competence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo	19
CAPÍTULO 2 – O USO DO ÍNDICE DE HACK NA AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ENERGÉTICA DE CANAIS DE DRENAGEM EM AMBIENTE DE ROCHAS SILICICLÁSTICAS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL	
Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo incluindo seus Grupos geológicos	35
Figura 2.2 - Representação esquemática do cálculo do Índice de Hack	40
Figura 2.3: Representação esquemática do cálculo do índice de Hack, segundo segmento hierarquizado	41
Figura 2.4: Hierarquização Fluvial da área de estudo	43
Figura 2.5: Mapa de densidade de drenagem da área de estudo	45
Figura 2.6: Área aplainada na bacia do rio Pardo	46
Figura 2.7: Mapa do Índice de Concentração da Rugosidade.....	48
Figura 2.8: Relevo da bacia do rio Pardo	49
Figura 2.9: Relevo da bacia do Alto Jequitinhonha	49
Figura 2.10: Mapa de lineamentos evidenciando a rede de drenagem e seus condicionamentos estruturais.....	51
Figura 2.11: Mapa de Densidade de <i>Knickpoints</i>	53
Figura 2.12: Mapa de Densidade de <i>Knickpoints</i> ponderado pelo IH regional	55
Figura 2.13: Índice de Hack Regional.....	57
Figura 2.14: Índice de Hack local	59

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E COMPETÊNCIA DE CURSOS FLUVIAIS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

Figura 3.1: Mapa de amostragem da área de estudo.....	73
Figura 3.2 Índice do poder de arredondamento (Powers' roundness index) ...	75
Figura 3.3: Mapa do índice de Hack por segmento hierarquizado.	77
Figura 3.4: Mapa da litologia da área de estudo.....	79

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E COMPETÊNCIA DE CURSOS FLUVIAIS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

Quadro 1: Grau de arredondamento de cascalhos em rios da bacia Pardo e Alto Jequitinhonha.....	83
Quadro 2: Informações a respeito dos pontos de amostragem da bacia Pardo, onde pode ser observado as variedades de padrões de rio.....	86
Quadro 3: Informações relativas aos rios amostrados na bacia Pardo e seus respectivos sedimentos de leito.	87
Quadro 4: Informações a respeito dos pontos de amostragem da bacia Alto Jequitinhonha, onde pode ser observado as variedades de padrões de rio. ...	90
Quadro 5: Informações relativas aos rios amostrados na bacia Alto Jequitinhonha e seus respectivos sedimentos de leito.....	91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E COMPETÊNCIA DE CURSOS FLUVIAIS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

Tabela 1: Estratigrafia da Serra do Espinhaço Meridional 70

Tabela 2 Informações referentes aos segmentos de rios amostrados..... 76

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 Localização da área de pesquisa.....	18
1.2 Índice de Hack como base para análise da energia de bacias hidrográficas .	19
1.3 Diferentes aplicações do IH	21
1.4 Referências Bibliográficas	24
CAPÍTULO 2 – O USO DO ÍNDICE DE HACK NA AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ENERGÉTICA DE CANAIS DE DRENAGEM EM AMBIENTE DE ROCHAS SILICICLÁSTICAS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL	29
2.1 Introdução	29
2.1.1 A importância da definição do comprimento do canal ou de seus segmentos para a aplicação do IH	31
2.2 Localização e caracterização da área de estudo.....	34
2.3 Procedimentos Metodológicos.....	36
2.3.1 Materias.....	36
2.3.2 Métodos.....	36
2.3.2.1 Hierarquização fluvial	36
2.3.2.2 Densidade de Drenagem (Dd)	37
2.3.2.3 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)	38
2.3.2.4 Extração dos lineamentos.....	38
2.3.2.5 Densidade de <i>Knickpoints</i>	39
2.3.2.6 Índice de Hack (IH)	39
2.4 Resultados e Discussões.....	42
2.5 Considerações Finais	60
2.6 Referências Bibliográficas	61
CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E COMPETÊNCIA DE CURSOS FLUVIAIS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL	67
3.1 Introdução	67
3.2 Caracterização da área	69
3.3 Procedimentos Metodológicos	71
3.3.1 Índice de Hack (IH).....	71
3.3.2 Trabalho de campo e coleta de amostras	72
3.3.3 Análises laboratoriais.....	74
3.4 Resultados	75

3.4.1 Índice de Hack.....	76
3.4.2 Granulometria	78
3.4.3 Análise do grau de arredondamento dos grãos de cascalho do leito.....	81
3.4.4 Análise da relação energia x competência dos sedimentos de leito	85
3.4.4.1. Bacia Pardo	85
3.4.4.2 Bacia Alto Jequitinhonha	89
3.5 Considerações Finais	93
3.6 Referências bibliográficas	95
CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	98

Estrutura da dissertação em formato de artigos

Esta dissertação está estruturada conforme as Normas para apresentação de Dissertações e Teses do Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Está organizada em quatro capítulos: capítulo 1 – Introdução; capítulo 2 – Artigo 1, capítulo 3 – Artigo 2; capítulo 4 – Conclusões.

O capítulo 1 corresponde a uma introdução que apresenta também fundamentos teóricos que norteiam as interpretações desse trabalho.

O capítulo 2 (Artigo 1), aborda a comparação entre o cálculo do índice de Hack utilizando unidades espaciais diferentes: cursos de água em sua totalidade, e seus segmentos hierarquizados, aplicados na análise da energia entre as bacias do rio Pardo e Alto Jequitinhonha.

O capítulo 3 (Artigo 2), trata da relação entre energia e competência dos rios, e da apresentação dos resultados sobre a eficiência da utilização do índice de Hack para medir energia dos canais da área estudada, o que teria segundo a base teórica de Hack (1960; 1973; 1975), relação com o diâmetro do material transportado.

O capítulo 4 corresponde as conclusões da dissertação. Ressalta-se que os resultados alcançados, além de atenderem aos objetivos da pesquisa e possibilitarem a manutenção das hipóteses aqui levantadas, constituem elementos para alimentar futuras pesquisas com foco no estudo da energia de canais de drenagem, o que possibilitaria a compreensão da relação energia/competência em outras áreas de condições ambientais distintas, dando origem a outros estudos.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

A elaboração do modelado do relevo é resultado da dinâmica entre os diferentes elementos naturais (geologia, clima, hidrografia, vegetação, solos), os quais são capazes de alterar as feições da paisagem na busca por um equilíbrio (HACK, 1960; LEOPOLD e LANGBEIN, 1962; HOWARD, 1965). Os processos que resultam dessa interação incorporam ao relevo características únicas em sua evolução, reveladas principalmente pelas formas e materiais que o constituem (THOMAS, 1974; GERRARD, 1988). Dentre os elementos naturais acima elencados, os canais fluviais se comportam como os principais agentes na esculturação do relevo, cuja forma se configura pelos processos morfogenéticos e morfoclimáticos incidentes na área em que percorrem.

No Brasil, o estudo de unidades extensas do relevo consideradas relativamente estáveis do ponto de vista tectônico, tende a seguir uma abordagem com base na dinâmica superficial, envolvendo sua modelagem, principalmente através dos processos exógenos (PRESS, 2006; THOMAS, 1994; CHAMANI, 2011).

Essas abordagens nem sempre oferecem instrumentação que permita a quantificação da energia envolvida na elaboração do relevo e nem de técnica que possibilite comparações entre diferentes áreas, embora alguns métodos apontem nesta direção (MONTGOMERY e FOUFOULA-GEORGIU, 1993; SAITO e TORIWAK, 1994; ROERING *et al.*, 2007; SAMPAIO, 2008; SAMPAIO e AUGUSTIN, 2014).

Mesmo considerando esses avanços, o trabalho de Hack, entre as décadas de 50 a 70 do século passado, trouxe novas perspectivas para comparação da evolução de grandes bacias de drenagem. Hack (1973) justifica essas abordagens tendo em vista que os sistemas de drenagem “apresentam propriedades geométricas regulares que podem ser quantitativamente descritas” (p. 421). Este autor vai mais além ao afirmar que em sistemas de relevo degradacionais “o perfil longitudinal de cursos de água pode oferecer indícios do material geológico subjacente, da mesma maneira que pistas sobre os processos geológicos e a evolução geomorfológica da área” (p. 421).

A análise de perfis longitudinais é uma abordagem clássica na geomorfologia, para análise de relevos, utilizada na obtenção de evidências da atuação de processos evolutivos, análises morfoestruturais e morfotectônicas (HACK, 1957; BRUSH, 1961; MORISAWA, 1962; CARLSTON, 1969; HACK, 1973; MCKEOWN *et al.*, 1988; SINHA e PARKER, 1996; KNIGHTON, 1998; SKLAR e DIETRICH, 2008). Muitos estudos têm mostrado a adaptação dos rios, declividade e padrões de drenagem pela estrutura e litologia (WOLMAN, 1955; HACK, 1957, 1960) e também pelas variações no clima ao longo do tempo (THOMAS, 1974; LEOPOLD, 1980; GERRARD, 1988), onde a análise de perfis longitudinais de rios mostra-se eficiente para interpretar as mudanças nas formas de relevo. A utilização dessa abordagem é, no entanto, ampla e, em muitos casos, basicamente qualitativa.

Durante estudos realizados na bacia do rio Potomac, EUA, Hack desenvolveu o *Stream-Gradient Index* (HACK, 1973), também conhecido como índice de Hack (IH)¹, que tem como base o estudo de perfis longitudinais ao longo dos fluxos de água, com base quantitativa, levando em consideração a declividade e extensão do perfil². Em função da sua abrangência e relativa facilidade de execução, ganha importância como instrumento analítico do relevo permitindo comparações de energia dentro dos sistemas das bacias hidrográficas.

O seu cálculo tem sido aplicado em canais de drenagem considerando seu comprimento total ou através da definição de trechos, ou segmentos, segundo critério do pesquisador. Como nesses casos há alteração de magnitude, há teoricamente a possibilidade de variação nos resultados finais do estudo.

Com base na aplicação do IH, trabalhos de Fonseca (2010), Fonseca e Augustin (2011) e Fonseca *et al.* (2014) foram realizados sobre as bacias dos rios Pardo e do Alto Jequitinhonha, na Serra do Espinhaço Meridional (SdEM), enfocando a questão da energia fluvial em uma perspectiva de análise geomorfológica regional. No cálculo do IH foram utilizadas medidas de comprimento total do rio,

¹O *Stream-Gradient index* proposto por Hack (1973) possui outra denominação no Brasil, *Relação Declividade Extensão* (RDE) intitulado por Etchebehere *et al.* (2004). Neste trabalho consideramos a denominação Índice de Hack (IH).

²O cálculo do IH pode ser realizado por uma equação simplificada: $SL = \Delta H / \text{Log}_e \Delta L$. Sendo, SL o índice (Declividade-Extensão), ΔH a variação altimétrica do segmento, ΔL a projeção horizontal do comprimento do rio a ser estudado.

evidenciando, essencialmente, grandes compartimentos de energia, como inclusive assinalado por Hack em seu artigo de 1973, ao afirmar que esse índice se aplica a canais extensos. Os resultados indicaram diferenças de energia significativas entre as duas bacias do Espinhaço Meridional, sendo que a do Alto Jequitinhonha apresentou maior vigor energético do que a do Pardo.

Este resultado levou à necessidade de buscar explicações para essas variações, como proposto por Hack (1973 e 1975) e Rhea, (1993) que apontam para a importância do aprofundamento sobre questões relativas às complexidades da dinâmica dos sistemas fluviais, em sua dimensão de redes e da bacia.

Como primeira etapa nessa análise, propõe-se o desenvolvimento desse trabalho a partir das seguintes hipóteses; (i) os resultados do IH utilizando um padrão de cálculo local, através de segmentos de rios hierarquizados, conseguirão identificar os inputs energéticos no sistema evidenciando de maneira mais clara o grau de anomalia e energia dentro do mesmo. Isto, porque parte-se da premissa de que o cálculo regional (todo o curso fluvial), pode não ser capaz de distinguir os valores de energia no sistema de forma tão detalhada, pois estes valores tendem a se dispersar no valor energético global da bacia;

(ii) a bacia do Alto Jequitinhonha deve apresentar maior vigor energético que a bacia do rio Pardo, mesmo quando analisadas sobre o mesmo domínio litológico do Supergrupo Espinhaço, reforçando os resultados de Fonseca (2010) e Fonseca *et al.* (2011; 2014), na escala regional, que considerou a bacia do rio Pardo em toda sua dimensão, incluindo uma escarpa com desnível de aproximadamente 300 metros no contato entre as rochas quartzíticas do Supergrupo Espinhaço e as carbonáticas do Grupo Bambuí. Em função dessa característica litoestrutural, se esperava uma maior intensidade energética em virtude da grande diferença topográfica resultante da diferente resistência dessas rochas, variável importante no cálculo do IH.

O objetivo geral desta dissertação é, portanto, comparar a dinâmica energética das porções das bacias Pardo e Alto Jequitinhonha que estão localizadas sobre o domínio das rochas siliciclásticas, do Supergrupo Espinhaço.

O trabalho foi limitado ao domínio das rochas siliciclásticas, buscando diminuir a influência de contatos litológicos entre rochas com resistências muito distintas, que segundo Hack (1960) seria uma das maiores causas de desequilíbrios no perfil longitudinal. Dessa maneira, a área de pesquisa está confinada às porções das bacias dos rios Pardo³ e Alto Jequitinhonha, localizadas exclusivamente sobre as rochas siliciclásticas do Supergrupo Espinhaço, ou seja, uma área relativamente homogênea, do ponto de vista de Grupos litológicos, que poderia evidenciar melhores condicionantes estruturais e elucidar a sua relação com a energia dos rios e conseqüentemente com o modelado do relevo.

Se busca ainda como objetivos específicos: (i) melhor compreensão da aplicação do IH, comparando seu uso em escala regional (uso do comprimento total do rio) com seu uso em escala local (uso dos segmentos dos cursos fluviais hierarquizados, segundo Strahler (1952)); (ii) obter melhor compreensão das relações existentes entre a energia e a competência dos rios em litologia siliciclástica, em meio tropical úmido, utilizando o índice de Hack em conjunto a análises granulométricas, (iii) analisar se as anomalias energéticas estão sendo mais condicionadas por fatores litológicos ou estruturais.

Em termos regionais, a SdEM é uma das unidades geomorfológicas mais investigadas do Estado de Minas Gerais apresentando, no entanto, especificidades e dificuldades interpretativas ainda não plenamente solucionadas (SAADI, 1995; RENGER e KNAUER, 1995; KNAUER, 2007; FONSECA, 2010; AUGUSTIN *et al.*, 2011, FONSECA e AUGUSTIN, 2014). O trabalho se justifica por sua contribuição sobre a dinâmica energética presente nas principais bacias da SdEM, e sua interpretação tendo como base a análise de maior detalhe do que as originalmente produzidas e que são de grande importância para o entendimento dos processos e respostas do modelado do relevo. Essa contribuição tanto é maior, na medida em que também fornece uma maior compreensão acerca da aplicação do IH e sua relação com a energia e competência dos rios, o que pode ser aplicado também a outras bacias de drenagem.

³ Na Serra do Espinhaço Meridional existem a bacia do rio Pardo Grande e sua sub bacia rio Pardo Pequeno. A bacia aqui denominada por bacia do rio Pardo é referente a bacia rio Pardo Grande.

1.1 Localização da área de pesquisa

As bacias do rio Pardo e Alto Jequitinhonha estão localizadas na SdEM, que se encontra integralmente dentro do estado de Minas Gerais, abaixo do paralelo 17°S e se estende até as proximidades de Belo Horizonte (MILAGRES *et al.*, 2015a; 2015b).

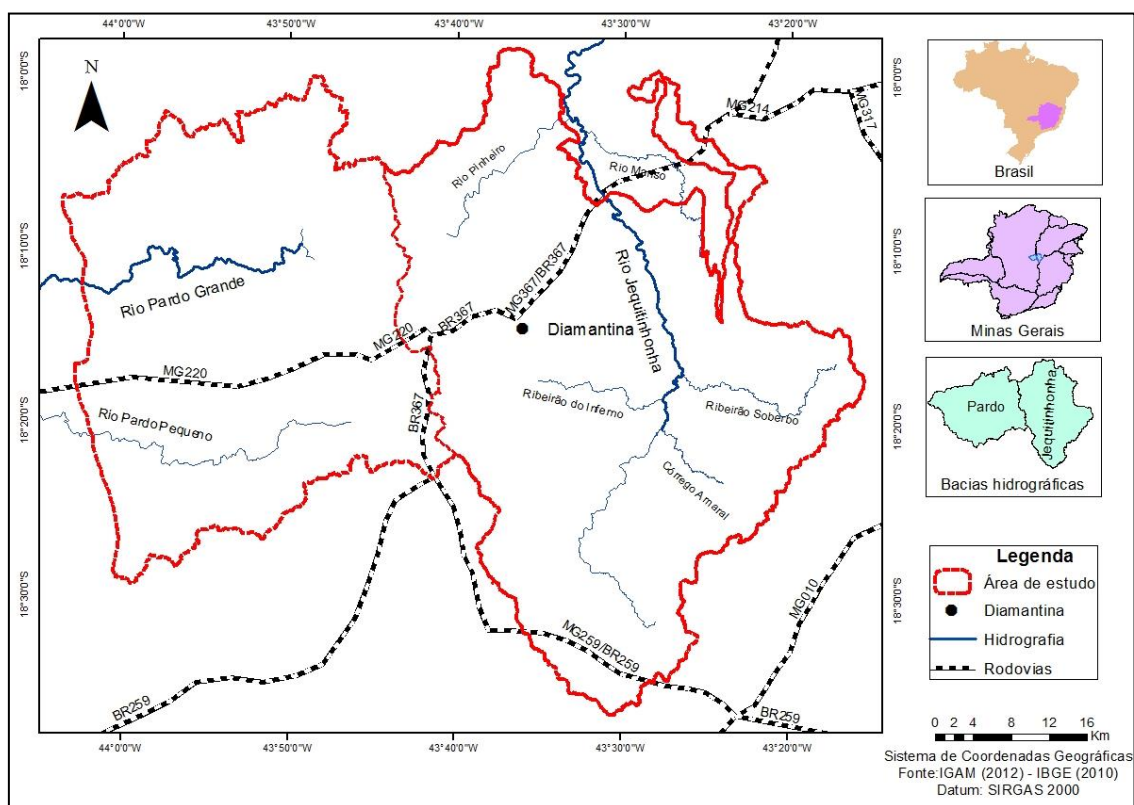
O rio Pardo Grande é o principal rio da bacia Pardo e um dos principais afluentes do rio das Velhas, o qual desagua diretamente na bacia do rio São Francisco. Esta bacia localiza-se na borda oeste da SdEM, e é formada por quartzitos do Supergrupo Espinhaço e por rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (UHLEIN *et al.*, 1995). Entretanto nesta pesquisa optou-se por trabalhar apenas as áreas do Supergrupo Espinhaço.

A bacia do Alto Jequitinhonha, cujo rio principal é o Jequitinhonha, está localizada na borda leste da SdEM. Esta bacia encontra-se, em grande parte, sobre rochas quartzíticas do domínio do Supergrupo Espinhaço, contando com apenas uma pequena faixa a nordeste de rochas do Grupo Macaúbas (MARTINS *et al.*, 2008), as quais não são exploradas neste estudo.

A área da pesquisa se concentra nas porções das duas bacias formadas sobre rochas siliciclásticas do Supergrupo Espinhaço. A cidade mais conhecida da área de estudo é Diamantina. O acesso a esta localidade, partindo de Belo Horizonte, pode ser realizado pela BR-040 em direção a Paraopeba, e, a seguir, BR-135 rumo a Curvelo. No entroncamento de Curvelo, segue-se em direção nordeste pela BR-259 e pelo seu prolongamento, a BR-367 rumo a Diamantina.

A BR-367 corta parte da área estudada, sendo que ela segue sobre uma parte do interflúvio das bacias Pardo e Alto Jequitinhonha, como pode ser observado na Figura 1. Através dela é possível obter o acesso a estradas secundárias, tanto em direção a oeste como a leste, viabilizando o trânsito entre as duas bacias.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo



1.2 Índice de Hack como base para análise da energia de bacias hidrográficas

O conceito de equilíbrio fluvial é um dos mais utilizados dentro da teoria geomorfológica, tendo sido discutido extensivamente na literatura acadêmica por diversos autores (GILBERT, 1877; HACK, 1960, 1975; LEOPOLD e MADDOCK, 1953; HOWARD, 1965; LEOPOLD, 1980). Gilbert (1877) foi o primeiro a utilizar a ideia de equilíbrio dinâmico, na discussão de declividades estáveis de um canal fluvial. Em expansão as suas ideias iniciais, Hack (1960, 1975), discute que o equilíbrio de uma realidade fisiográfica particular envolve um balanço entre o processo de erosão, a resistência das rochas e o diastrofismo. Ainda segundo este autor, a topografia está em um estado fixo e permanecerá inalterada sob essa forma desde que as taxas de soerguimento e erosão não mudem e de que não sejam exumadas rochas com resistências diferentes das anteriormente expostas. Caso as taxas relativas de erosão e/ou soerguimento se alterem, o estado de equilíbrio dinâmico também se alterará. A topografia então mudará de um estado de equilíbrio para outro.

Nesse sentido, é possível deduzir que a distribuição espacial de características geológicas seria o principal controle do relevo. Hack (1960, 1973, 1975), argumenta que a crosta terrestre não é isotrópica e, mesmo nos menores sistemas fluviais, existe considerável variação em sua composição e estrutura. Rochas mais resistentes, quando posicionadas de maneira adjacente a rochas menos resistentes, prescrevem relevo mais declivoso e com maior desnível altimétrico do que o terreno de rochas menos resistentes.

O equilíbrio dinâmico exige uma taxa de saída de materiais iguais em terrenos adjacentes, uma vez que a topografia está em estado estável (*steady state*). Nesse sentido, a comparação da energia de duas bacias hidrográficas, Pardo e Alto Jequitinhonha, formadas sobre a mesma litologia de rochas siliciclásticas do Supergrupo Espinhaço, pode auxiliar na compreensão dos condicionantes mais importantes da energia nestas áreas. Caso seja a litologia, a distribuição energética nestas bacias não teria grandes variações; caso haja muitas variações energéticas entre elas, pode-se tentar encontrar um condicionamento estrutural mais evidente.

Hack (1973) apresenta o índice, que leva o seu nome, através do estudo de perfis longitudinais e carga de leito de rios localizados no Vale Shenandoah, Virginia – EUA (HACK, 1957), e afirma ter conseguido determinar uma relação empírica entre a declividade do canal, o comprimento do canal e o tamanho médio da carga de leito do rio.

A partir de evidências empíricas, Hack (1973) observou que o valor do produto do IH está diretamente relacionado à competência de um rio. Ele encontrou evidências de que um aumento médio no tamanho das partículas depositadas no leito do rio está correlacionado a um aumento no valor do produto do IH (HACK, 1973). Assumindo que a competência e capacidade de um rio estejam diretamente relacionadas com sua energia é possível assumir que o IH seja uma medida do vigor energético dos rios (KELLER e PINTER, 1996). Dessa maneira, o IH exhibe duas virtudes: é uma medida da declividade relativa de um canal fluvial ao mesmo tempo em que representa um índice do vigor energético do mesmo.

1.3. Diferentes aplicações do IH

Em seu trabalho de exposição do IH, Hack (1973) apresentou diferentes exemplos de sua aplicação em estudos geomorfológicos: na análise individual de cursos fluviais e na análise regional.

A análise individual de cursos fluviais trabalha com a variação de valores do índice ao longo do perfil longitudinal em escala semi-logarítmica de um curso fluvial qualquer. A aplicação do índice nesse caso seria a de identificar, de maneira ágil, a influência de litologias com resistências diferentes ao longo do perfil longitudinal: litologias mais resistentes determinariam maiores valores de IH, enquanto litologias menos resistentes prescreveriam menores valores.

Dessa maneira, a distribuição do IH e do tamanho médio da carga de leito seriam controlados pela distribuição espacial, de litologias de diferentes resistências à mobilização do material, sob as condições climáticas daquela área. Além disso, qualquer mudança estrutural (falhas, fraturas, lineamentos) também seria percebida.

A análise regional da utilização do IH para Hack (1973), corresponderia ao cálculo do índice para todos os cursos fluviais de uma determinada área, onde seriam definidos intervalos espaciais regulares para o cálculo em todos os rios. Esses intervalos determinariam o comprimento dos trechos para os quais o índice seria calculado e então cada trecho de rio desta área teria o seu IH definido.

Neste trabalho é apresentado o cálculo para dois intervalos espaciais de comprimento, distintos, um utilizando o comprimento total do rio, denominado aqui por análise regional; e o outro, como proposta deste trabalho, utilizando o comprimento do rio hierarquizado, segundo Strahler (1952), denominado aqui como análise local, estando essas duas abordagens dentro da análise regional denominada por Hack (1973), no sentido de ser aplicada sobre os rios de uma região ao invés de um único rio.

O motivo para essa distinção entre análise regional e análise local aqui usadas, é o de expressar a diferença entre os dois intervalos espaciais do comprimento

do rio para o cálculo, onde as escalas se tornam distintas e como hipótese as respostas obtidas por estas aplicações também.

Na espacialização dos valores calculados seria executada alguma forma de interpolação (não explícita por HACK, 1973), que determinaria um mapa de distribuição contínua de valores do IH, que permite espacializar seus valores por área. Hoje, com a evolução do Sistema de Informação Geográfica (SIG) já existem diversos interpoladores que realizam a espacialização com maior rapidez, sem que estas interpolações percam seu significado ao passarem de uma medida linear para uma zonal (SAITO e TORIWAKI, 1994; BEATSON *et al.*, 2001; FORNBERG e ZUEV, 2007; RAJASHEKARA, *et al.*, 2012).

Hack (1973) criou o IH para ser uma ferramenta quantitativa e identificar se, respostas de equilíbrio dinâmico frente a variações espaciais litológicas e descontinuidades nos perfis longitudinais semi-logarítmicos seriam respostas a variações geológicas. Entretanto, com o aumento do uso desse índice pelos geomorfólogos em suas pesquisas, foram identificadas outras interpretações para desequilíbrios nos perfis longitudinais de rios, e com isso, outras aplicações com objetivos diferentes. Isto foi indicado por Hack (1973), quando ele aponta que esse índice indica “clues”, ou seja, indícios apenas, de que há variações de energia entre os sistemas hidrográficos, cujas causas deveriam ser mais detalhadamente analisadas.

Nesse sentido, é possível identificar a aplicação do índice para uma vasta gama de abordagens geomorfológicas e geológicas em trabalhos publicados. O IH foi aplicado, por exemplo, por Rhea (1993) para a identificação de diferenças de soerguimento na faixa costeira de Oregon-EUA; por Mayer e Wentworth (1983) para inferir movimentação da falha de Stafford - nordeste do Estado da Virgínia - EUA; por Keller (1977) e Keller e Rockwell (1984) para a identificação de "células tectônicas" de grande atividade em partes da Califórnia - EUA; por Seeber e Gornitz (1983) para a detecção de atividade neotectônica no Himalaia; por McKeown *et al.* (1988) para inferir a expressão fisiográfica de uma série de registros sísmicos na região montanhosa de Ozark, Estado do Arkansas-EUA; por Etchebehere *et al.* (2004) e Etchebehere *et al.* (2006) para a identificação de deformações neotectônicas no Vale do Rio Peixe - Estado de São Paulo; por

Troiani e Della Seta (2008) para análise morfotectônica de pequenas bacias na região central da Itália; por Souza *et al.* (2011) para identificar rupturas de declive, vinculados a processos de tectônica e erosão diferencial num trecho do rio Zêzere, afluente do rio Tejo - Portugal, entre muitos outros exemplos.

Os trabalhos de Fonseca (2010) e Fonseca e Augustin (2011, 2014), partindo de uma análise regional, atestaram que o IH é efetivo para medidas do vigor energético dos rios, buscando identificar também os fatores, em escala regional, responsáveis por essas variações entre as bacias estudadas: do Alto rio Jequitinhonha e do rio Pardo.

É importante tentar observar a influência das confluências dos rios na distribuição do IH, pois é a partir delas que ocorre súbito aumento na descarga e nos sedimentos carregados causando ajuste das características hidráulicas e físico-químicas dos rios (KNIGHTON, 1998). Por isso, o cálculo do IH utilizando o comprimento dos rios segundo Strahler (1952) poderia ser um bom indicativo para entender os efeitos e variações energéticas dos rios de uma determinada área.

Em adição a estas influências primárias de mudanças de gradiente podem haver efeitos secundários, que são as respostas dos rios através de processos de agradações e degradações. Tais respostas apontam na direção de que estudos estratigráficos e sedimentológicos possam ser relacionados diretamente com os estudos da distribuição do IH e, que, além disso, os mesmos podem servir de teste para as diferentes interpretações advindas da utilização do índice.

Ainda é importante analisar se as correlações encontradas por Hack entre a energia do canal e seus materiais, com base na competência de um rio para carrear sedimentos de determinados tamanhos, se faz presente nos meios tropicais úmidos, nos quais o intemperismo químico é muito ativo, respondendo pelo desenvolvimento de espesso manto de alteração, (DELVIGNE, 1965; MILLOT, 1983; THOMAS, 1994; TURKINGTON *et al.*, 2005). Isto poderia, teoricamente, interferir na produção de sedimentos grossos, mesmo em bacias com relativa energia.

1.4 Referências Bibliográficas

AUGUSTIN, C.H.R.R.; FONSECA, B.M.; ROCHA, L.C. Mapeamento geomorfológico da Serra do Espinhaço Meridional: primeira aproximação. **Geonomos**, v.19, n.2, p.50-69, 2011.

BEATSON, R.K., LIGHT, W.A.; BILLINGS, S. Fast solution of the radial basis function interpolation equations: domain decomposition methods. **SIAM J. Science Comput**, v.22, n.5, p.1717-1740, 2001.

BRUSH, L.M.Jr. Drainage basins, channels, and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania: **U.S. Geological Survey Professional Paper**, v.282, p. 145-181, 1961.

CARLSTON C.W. Longitudinal slope characteristics of rivers of the mid-continent and the Atlantic east Gulf slopes. **International Association of Scientific Hydrology Bulletin**, v.14, n.4, p. 21-31, 1969.

CHAMANI, M.A.C. **Tectônica intraplaca e deformação sinsedimentar induzida por abalos sísmicos: O lineamento Transbrasiliano e estruturas relacionadas na província Parnaíba, Brasil**. 2011. 206 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

DELVIGNE, J. **Pédogenese en zone tropicale. La formation dès minéraux secondaires em millieu ferrallitique**. Mém. ORSTROM 13, Dunod, Paris, 1965, 177 p.

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 de Instituto de Geociências da USP – Séries Científica**, v. 4, n.2, p.43-56, 2004.

ETCHEBEHERE, M.L.C.; SAAD, A.R.; SANTONI, G.; CASADO, F.C.; FULFARO, V.J. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do rio do Peixe, região Ocidental Paulista, mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade-Extensão) em segmentos de drenagem. **Revista Brasileira de Geociências - UNESP**, v.25, n. 3, p.271-287, 2006.

FONSECA, B.M. **O uso do Sistema de Informações Geográficas na análise morfométrica e morfológica de bacias de drenagem na Serra do Espinhaço Meridional – MG**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Análise Ambiental), programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

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. **Anais...** Santiago, 2011, p. 1-12.

FONSECA, B.M.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Análise morfométrica de bacias de drenagem e sua relação com a estrutura geológica, serra do Espinhaço Meridional MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n.2, p.153-172, 2014.

FORNBERG, B.; ZUEV, J. The Runge phenomenon and spatially variable shape parameters in RBF interpolation. **Comput. Math. Appl.** v.54, n.3, p. 379-398, 2007.

GERRARD, A.J. **Rocks and Landforms**. Unwin Hyman Ltd, London, 1988, 319p.

GILBERT, G. K. Report on the Geology of the Henry Mountains. **Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region**, Department of the Interior, p.1-17, 1877.

HACK, J.T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Marylan. **U.S Geol. Survey Professional Paper**, v. 294-B, p. 45-97, 1957.

HACK, J.T. Interpretation of erosional topography in Humid Temperate regions. **American Journal of Science**, v. 258 A, p 80-97, 1960.

HACK, J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal of Research of the United States Geological Survey**, v.1, n.4, p.421-429, 1973.

HACK J.T. Dynamic equilibrium and landscape evolution. In: MELHORN, W.L.; FLEMAL, R.C. **Theories of Landform Development**, State University of New York Press, Binghamton, NY, 1975, p. 87–102.

HOWARD, A.D. Geomorphological system—equilibrium and dynamics. **American Journal of Science**, v. 263, p. 302-312, 1965.

KELLER, E.A. Adjustment of drainage to bedrock in regions of contrasting tectonic framework. **Geological Society of America**, v.9, n. 7, p.10-46, 1977.

KELLER, E.A.; ROCKWELL, T.K. Tectonic geomorphology, Quaternary chronology, and paleoseismicity. In: COSTA, J.E.; FLEISHER, P.I., eds., **Developments and applications of geomorphology**, New York, Springer-Verlag, 1984, p. 203-239.

KELLER E.A. e PINTER N. **Active tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscapes**. Prentice Hall, New Jersey, 1996, p.234.

KNAUER, L.G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.15, n.1, p. 81-90, 2007.

KNIGHTON, A.D. **Fluvial forms and processes: a new perspective**. Arnold, London, U.K. 1998.

LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. **Geological Survey Professional Paper**. v.252, p.1-57, 1953.

LEOPOLD, L.B. Techniques and interpretation: The sediment studies of G. K. Gilbert. **Geological Society of America**, Special Paper, v.183, p.125-128, 1980.

LEOPOLD, L.B.; LANGBEIN, W.B. The concept of entropy in landscape evolution, U.S. **Geological Survey Professional Paper**, v. 500-A, 20p., 1962.

McKEOWN, F.A.; JONES-CECIL, M.; ASKEW, B.L.; McGRATH, M.B.. Analysis of stream-profile data and inferred tectonic activity, Eastern Ozark Mountains region. **U. S. Geological Survey Bulletin**, n.1807, p.1-39, 1988.

MARTINS M.S, KARFUNKEL J., NOCE C.M., BABINSKI, M., PEDROSA-SOARES A.C., SIAL A.N., LIU D. A seqüência pré-glacial do Grupo Macaúbas na área-tipo e o registro da abertura do rifte Araçuaí. **Revista Brasileira de Geociências**, v.38, n.4, p.761-772, 2008.

MAYER, L.; WENTWORTH, C.M. Geomorphic differences east and west of the Stafford fault system, northeastern Virginia. **Geological Society of America**, v. 15, n. 2, p.56, 1983.

MILAGRES, A.R.; AUGUSTIN, C.H.R.R.; FONSECA, B.M. Comparação entre padrões de cálculo do índice de Hack na bacia do Rio Pardo, Serra do Espinhaço Meridional, MG. **Revista Equador**, v. 4, p. 656-662, 2015a.

MILAGRES, A.R.; AUGUSTIN, C.H.R.R.; FONSECA, B.M. Análise da Relação entre Energia e Competência de Cursos Fluviais em Bacias de Drenagem na Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil. In: VII Congresso Nacional de Geomorfologia. Lisboa: Associação Portuguesa de Geomorfólogos, 2015b, **Anais** v. IX. p. 145-150.

MILLOT, G. Planation of Continents by Intertropical weathering and pedogenetic processes. In: **Proceedings of the II International Seminar on Laterization Processes**, São Paulo, IGCP-129/IAGC, 1983, p.53-63.

MONTGOMERY, D.R.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Channel networks sources representation using digital elevation models. **Water Resour**, v. 29, p. 1925-1934, 1993.

MORISAWA, M.E. Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, v.73, p.1025-1046, 1962.

PRESS, F. **Para entender a Terra**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RAJASHEKARA, H. M.; VARDHAN, P.; DAYA SAGAR, B.S. Generation of Zonal Map From Point Data via Weighted Skeletonization by Influence Zone **Geoscience and remote sensing letters**, v.9, n.3, p. 403-407, 2012.

RENGER, F.E. e KNAUER, L.G. Espinhaço – Quo vadis? (Onde está? Aonde vai?) A evolução dos conhecimentos sobre a Cordilheira do Espinhaço Meridional em Minas Gerais entre 1979 e 1995. **Geonomos**, v.3, n.1, p.31-39, 1995.

- RHEA, S. Geomorphic observations of rivers in the Oregon coast range from a regional reconnaissance perspective. **Geomorphology**, v.6, n.2, p.135-150, 1993.
- ROERING J.J.; PERRON, TAYLOR; KIRCHNER, J.W. Functional relationships between denudation and hillslope form and relief. **Earth and Planetary Science Letters**, v.264, p. 245–258, 2007.
- SAADI, A.A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e suas margens. **Geonomos**, v.3, n.1, p.41-63, 1995.
- SAITO, T.; TORIWAKI, J.I. “New algorithms for Euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications,” **Pattern Recognit.**, v.27, n.11, p.1551-1565, 1994.
- 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. 2008. 147 f. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
- SAMPAIO T.V.M.; AUGUSTIN C.H.R.R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a Cartografia Geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.15, n.1, p.47-60, 2014.
- SEEBER, L., GORNITZ, V.M. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, v. 92, n.4, p.335-367, 1983.
- SINHA, S.K.; PARKER, G. Causes of concavity in longitudinal profiles of rivers. **Water Resources Research**, v. 32, n.5, p.1417-1428, 1996.
- SKLAR, L.S.; DIETRICH, W.E. Implications of the saltation-abrasion bedrock incision model for steady-state river longitudinal profile relief and concavity. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.33, n.7, p.1129-1151, 2008.
- SOUZA, D.V.; MARTINS, A.A.; FARIA, A.L.L. Aplicação do índice de Hack (SL) a um trecho do rio Zêzere, Portugal. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n.1, p. 23-28, 2011.
- STRAHLER, A.N. Dynamic basis Geomorfology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n.9, p. 923-938, 1952.
- THOMAS, M.F. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates**. Macmillan, London, 1974, 329p.
- THOMAS, M.F. **Geomorphology in the Tropics - a study of weathering and denudation in low latitudes**. New York, John Wiley e Sons, 1994. 460p.
- TROIANI, F.; DELLA SETA, M. The Use of the Stream Length-Gradient Index in Morphotectonic Analysis of Small Catchments: A Case Study from Central Italy. **Geomorphology**, v.102, n.1, p.159-168, 2008.

TURKINGTON, A.V.; PHILLIPS, J.D.; CAMPBELL, S.W. Weathering and landscape evolution. **Geomorphology**, v.67, n.4, p.1-6, 2005.

UHLEIN, A.; TROMPETTE R.; EGYDIO-SILVA M.E. Rifteamentos superpostos e tectônica de inversão da borda sudeste do Cráton do São Francisco. **Geonomos**, v.3, n.1, p. 99-107, 1995.

WOLMAN, M.G. The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania. **U.S Geol. Survey Professional Paper**, v. 271, 56p, 1955.

CAPÍTULO 2 – O USO DO ÍNDICE DE HACK NA AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE ENERGÉTICA DE CANAIS DE DRENAGEM EM AMBIENTE DE ROCHAS SILICICLÁSTICAS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

2.1 Introdução

Os estudos relacionados às drenagens fluviais sempre foram relevantes na geomorfologia. Parte-se do princípio de que a análise da rede hidrográfica pode levar à compreensão e elucidação de numerosas questões geomorfológicas, pois os cursos de água constituem os principais responsáveis pelos processos morfogenéticos, e são os agentes ativos na esculturação da paisagem (LEOPOLD e MADDOCK 1953; HACK, 1960; HOWARD, 1967; VOLKOV *et al.*, 1967; PHILLIPS e SCHUMM, 1987; SCHUMM, 1993; WESCOTT, 1993).

A análise dos perfis longitudinais de rios, muito difundida nos estudos geomorfológicos (HACK, 1957; BRUSH, 1961; MORISAWA, 1962; CARLSTON, 1969; HACK, 1973; MCKEOWN *et al.*, 1988; SINHA e PARKER, 1996; KNIGHTON, 1998; SKLAR e DIETRICH, 2008) foi essencial para que Hack (1973) desenvolvesse o *Stream-Gradient Index* ou também conhecido por índice de Hack (IH), que representa a relação entre a declividade e a extensão do canal fluvial, contribui para avaliações sistemáticas de questões energéticas e litoestruturais de determinada bacia hidrográfica e ainda auxilia no entendimento das atuais formas de relevo.

Esse índice representa, de uma maneira geral, “o poder de um rio em transportar material de um tamanho específico e às características do canal em resistir ao fluxo” (Hack, 1973, p. 421). De acordo com o autor, essa relação foi, “validada de maneira empírica pelos dados dos fluxos fluviais da bacia do Potomac, a partir da aplicação da relação entre o tamanho das partículas no leito fluvial, e a extensão e inclinação do canal” (p. 421), sendo que foi constatado que quando ocorre um aumento no tamanho das partículas, esse aumento é refletido no produto IH.

Em seu artigo de 1973, Hack aponta para o fato de que a maior parte dos cursos de água não tem um perfil longitudinal logarítmico como representado pela

equação $SL=k$, sendo “SL” *slope length* (declividade extensão) e k uma constante. Segundo o autor, esses perfis são formados “por uma série de segmentos de várias extensões, cada um na forma de logaritmo” (p. 421). Assim, “o valor de k (equivalente ao produto SL) se diferencia como um todo ao longo do canal fluvial, mas permanece constante para qualquer segmento logarítmico em particular. Uma vez que, “o valor de k define a inclinação do perfil logarítmico para este segmento, ele pode ser considerado como um índice da inclinação relativa do perfil atual localmente” (p. 421). Em função disso, o autor denominou “o produto SL (que é equivalente ao da constante k na equação $SL=k$)”, de índice de gradiente, ou *gradient index*”.

Embora Hack (1973) chame a atenção para o fato de que essa “relação entre o *gradient index* e a geometria dos cursos fluviais não tenha ainda sido entendida” (p. 421), ou seja, não é ainda claramente estabelecido como o produto da declividade e sua extensão se relaciona com a competência do rio, isso deve estar associado “às complexas inter-relações da geometria hidráulica que caracterizam as condições de equilíbrio nos cursos fluviais” (p. 421). Hack remete assim, às questões levantadas em seu artigo de 1960, no qual reforça o conceito de “equilíbrio dinâmico como base para interpretar formas topográficas em um relevo erosivo” (p. 80), conceito este, originalmente apresentado por Gilbert (1877).

Hack (1973) aponta como base analítica para o equilíbrio dinâmico o fato de que “cada vertente e cada canal em um sistema submetido à erosão, encontram-se ajustados entre si” (p. 422). Assim, diferenças no relevo e nas formas podem ser explicadas mais em termos de relações espaciais do que em termos da evolução ao longo do tempo, refutando assim, os pressupostos de Davis (1899).

Sua proposta do índice baseia-se, portanto, em um conceito de reajustes internos ao sistema, de tal maneira que o IH representaria a quantificação desses ajustes. Havendo desajustes, estes ocorreriam como resultado de novos inputs de energia, o que faria com que todo o sistema procurasse novamente entrar em equilíbrio, ou seja, a se ajustar. Nesse sentido, Hack (1960) considera que “o relevo e os processos de modelagem são considerados parte de um sistema aberto em um estado de equilíbrio estável, no qual, cada vertente e cada forma

encontra-se ajustadas entre si” (p.80). Assim, ainda segundo o autor, “mudanças nas formas da topografia acontecem quando as condições do equilíbrio mudam” (p. 80), sem, contudo, ter que se enquadrar em um ciclo, como proposto por Davis.

A questão do ajuste e reajuste da bacia é assim consequência das forças intrínsecas que atuam nela e resultante da interação entre essas forças, de tal maneira, que em uma topografia ajustada, qualquer mudança na declividade do canal encontra-se relacionada ao relevo total. Hack (1975) considera que a ocorrência de desequilíbrio em um canal, provoca a necessidade de reajuste em todo o sistema fluvial da bacia. Nessa perspectiva, o estudo das relações energéticas com o auxílio do IH em uma bacia pode contribuir para a avaliação sistemática da evolução da mesma. Entretanto, Hack (1973), de certa maneira, também aponta limitações em seu índice, ao lembrar que ele apenas traz “indícios” sobre os controles do material geológico e os processos e evolução geomorfológicos, deixando subentendido que só a aplicação do índice não responde às diversas questões envolvidas na dinâmica dos rios.

Contudo, a possibilidade de utilizar um método que quantifique a energia das bacias, permitindo compara-las e associar essas variações de energia, aos processos e evolução das formas de relevo, bem como a evolução das técnicas de representação espacial com o SIG, têm estimulado o uso do IH, para detectar alterações nos cursos fluviais decorrentes de anomalias de drenagem, de maneira a avaliar o vigor energético dos mesmos.

2.1.1 A importância da definição do comprimento do canal ou de seus segmentos para a aplicação do IH

Muitos pesquisadores utilizaram o IH com o intuito de identificar relações com anomalias tectônicas/neotectônicas (KELLER, 1977; MAYER e WENTWORTH, 1983; SEEBER e GORNITZ, 1983; KELLER e ROCKWELL, 1984; MCKEOWN *et al.*, 1988; RHEA, 1993; ETCHEBEHERE *et al.*, 2004; ETCHEBEHERE *et al.*, 2006; TROIANI e DELLA SETA, 2008; SOUZA *et al.*, 2011; SORDI *et al.*, 2015) e na avaliação da dinâmica energética de rios (KELLER e PINTER, 1996; FONSECA, 2010). Cabe salientar que, embora não tenha sido mencionado nesses trabalhos, assume-se que existe a possibilidade de mudanças nos

resultados finais de um estudo, em função da alteração na escolha do comprimento do canal para a aplicação do índice.

Quão significativos são esses segmentos? Uma das questões que podem ser levantadas com relação ao uso desse método, é a da escala das medidas a serem utilizadas nas análises, ou seja, qual o comprimento da seção do fluxo de água a ser considerado na relação SL (declividade/extensão)? A escala dessas medidas alteraria em qual nível os resultados? Há necessidade de hierarquização da drenagem?

Embora Hack não estabeleça um padrão a partir do qual esses segmentos dos canais devessem ser medidos, em seu artigo de 1973, ele chama a atenção para o fato de que essa metodologia é aplicável a canais fluviais longos, “independente da extensão dos seus perfis” (p. 421). Outra questão que pode ser levantada no uso do IH, refere-se a como identificar mudanças de energia que devem/podem requerer reajustes no sistema?

Hack (1973) ao desenvolver este índice conclui que é possível avaliar o estado de equilíbrio de determinado trecho. Quando ocorre um desequilíbrio em uma bacia deveria ser possível identificar nos perfis longitudinais a presença de níveis de base locais identificados através de desnivelamento, ou rupturas de declive, que marcariam mudanças de energia. Essas rupturas são denominadas *knickpoints* (BJORNBERG, 1969) que, segundo Guedes *et al.* (2006), ocorrem principalmente devido a 1) confluência com trechos de caudal forte; 2) variação da resistência litológica; 3) variação eustática, o que causa erosão remontante por modificação forte no nível de base; e 4) deformações tectônicas ou neotectônicas. Representando assim, mudanças na rede hidrográfica, que refletem em toda a morfologia da bacia, sugerindo a busca por um equilíbrio dinâmico.

Diante disso, entende-se que o processo de cálculo do IH aplicado aos segmentos da rede de drenagem hierarquizados conforme Strahler (1952), em uma área relativamente homogênea do ponto de vista litológico, uma vez que se concentra apenas nas rochas siliciclásticas, pode evidenciar melhores condicionantes estruturais e elucidar a sua relação com a energia dos rios e conseqüentemente com o modelado do relevo.

O IH também é aplicado basicamente para identificar o vigor energético dos rios/bacias, sendo que, sua aplicação exclusivamente como método de investigação neotectônica constitui uma extrapolação dos fundamentos teóricos que sustentam a interpretação de como a energia entra, é transformada e utilizada, e os reajustes que isto provoca no sistema.

Fonseca (2010) e Fonseca *et al.* (2014) o utilizou para identificar a energia presente nos rios das bacias Pardo e Alto Jequitinhonha e interpretar o potencial de dissecação do relevo. Esses autores partiram de uma perspectiva de análise geomorfológica regional, ou seja, utilizaram o comprimento total do rio para o cálculo do IH, sendo que os resultados obtidos indicaram diferenças de energia significativas entre as duas bacias, com maior vigor energético na bacia do Alto Jequitinhonha do que na bacia Pardo. Fonseca (2010) e Fonseca *et al.* (2014) sustentam a hipótese de uma maior influência estrutural do Alto Jequitinhonha, o que explicaria um maior potencial energético da rede de drenagem nesta bacia.

Verifica-se, assim, uma lacuna metodológica no uso deste instrumento analítico, visto que procedimentos até agora adotados por pesquisadores já citados, e tantos outros, não deixaram claro as implicações na alteração do comprimento do trecho do rio escolhido para o cálculo, o qual pode variar segundo classes hierárquicas e comprimentos de segmentos medidos, o que remete à necessidade de testar esses parâmetros, como também ambiguidades com relação a causa e efeito. Da mesma maneira, como tornar mais evidente as rupturas de declive através de métodos de geoprocessamento, com o devido controle de campo.

O objetivo geral deste capítulo é o de investigar se a mudança no tamanho dos segmentos de cálculo do IH, alteram o resultado final em comparação com aqueles já obtidos para essas bacias do Espinhaço Meridional-MG: a do Pardo, na borda oeste e a do Alto Jequitinhonha, na borda leste.

Outro objetivo é o de propor, caso ocorram diferenças, novos procedimentos que venham aprimorar e enriquecer este método de análise, em especial sua aplicação para áreas tropicais, que apresentam em geral mantos espessos de alteração.

Para a análise dos dados, como indicado por Hack (1973) e Rhea (1993), serão também considerados outros parâmetros morfométricos, para auxiliar nas interpretações relacionadas à variabilidade energética dos canais e visando interpretações do processo de evolução e dissecação do relevo. Essas análises darão suporte para compreender os padrões de evolução diferenciados dentro do mesmo domínio litológico das rochas do Supergrupo Espinhaço, possivelmente associados a mudanças nos fatores ligados aos níveis de base e/ou tectônicos na região.

2.2 Localização e caracterização da área de estudo

A Serra do Espinhaço constitui um extenso planalto que funciona como um importante divisor hidrográfico interposto entre a bacia do rio São Francisco e as bacias do centro-leste brasileiro (RENGER e KNAUER, 1995; SAADI, 1995). Sua porção Meridional encontra-se integralmente localizada no estado de Minas Gerais, abaixo do paralelo 17°S e se estende até as proximidades de Belo Horizonte (MILAGRES *et al.*, 2015a). Segundo Saadi (1995) a predominância dos quartzitos em toda a área compõe uma cobertura rígida, muito fraturada e cisalhada, com um relevo característico por vales profundos, cristas e escarpas que estão adaptadas as direções tectônicas e estruturais.

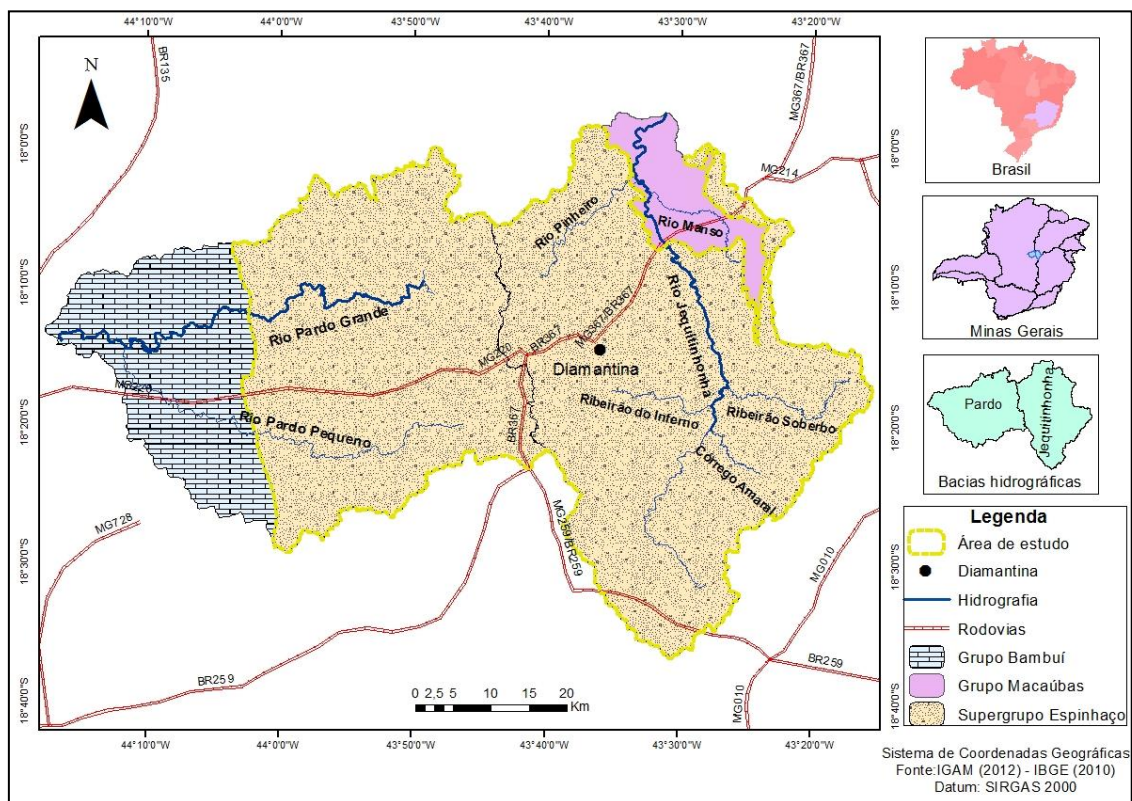
Neste contexto estão inseridas as bacias do Pardo, afluente do São Francisco, e a bacia do Alto Jequitinhonha. A área da pesquisa se concentra nas porções destas bacias localizadas exclusivamente sobre o domínio das rochas siliciclásticas, do Supergrupo Espinhaço (Figura 2.1).

A bacia do Alto Jequitinhonha situada na borda leste da SdEM, desenvolve-se em grande parte sobre o domínio do Supergrupo Espinhaço, apenas uma pequena faixa a nordeste encontra-se sobre rochas do Grupo Macaúbas, que segundo Martins *et al.*, (2008) são depósitos do período Neoproterozóico, formado principalmente por conglomerados, diamictitos e arenitos. A bacia do rio Pardo, localizada na borda oeste do planalto, é formada por quartzitos do Supergrupo Espinhaço, no entanto, sua porção oeste se encontra sobre rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, também de idade Neoproterozóica (RENGER e KNAUER, 1995), como apresentado na Figura 2.1.

O Supergrupo Espinhaço encontra-se estruturado por um conjunto de falhas de empurrão/zonas de cisalhamento com direção geral N-S e por amplas dobras de eixo que tendem para a mesma direção, resultado das compressões de E-W do Evento Brasileiro no Neoproterozóico (650-530 Ma) (FOGAÇA, 1997), este fato explica a ocorrência de maior deformação na porção leste da Serra, onde se encontra a bacia do Alto Jequitinhonha, isso aliado a expressiva altitude, criam condições para a evolução de nascentes, o que faz do Espinhaço Meridional uma importante área de recarga (FONSECA e AUGUSTIN, 2014).

Estes elementos estruturais (falhas, dobras, zonas de cisalhamento), são responsáveis pela modelagem do relevo destas bacias, uma vez que, influenciam na intensidade dos processos que atuam sobre esta área. A bacia Pardo, mais preservada de deformações tectônicas, possui um relevo menos dissecado, com grandes áreas aplainadas em meio aos afloramentos, já a bacia do Alto Jequitinhonha possui um relevo muito dissecado, característico por seus desníveis acentuados e alta declividade das vertentes.

Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo incluindo seus Grupos geológicos



2.3 Procedimentos Metodológicos

John T. Hack desenvolveu muitos estudos na região da Costa leste dos Estados Unidos e escreveu diversos artigos (HACK, 1955; 1957; HACK e YOUNG, 1959; HACK, 1960; 1973; 1975) que contribuíram muito para a evolução do pensamento geomorfológico. Entretanto, é necessário tomar certo cuidado ao assumir as interpretações que o autor fez para regiões temperadas e realiza-las sem modificações em regiões tropicais, como é o caso do Brasil, uma vez que, o clima se torna diferente e os processos muito distintos.

Dessa forma, julga-se necessário compreender a configuração do relevo na área em estudo, para facilitar as interpretações do IH, e ter um melhor entendimento do seu uso em ambiente tropical úmido. Para isso, foram realizados alguns cálculos morfométricos com o intuito de analisar a estruturação e configuração da área de estudo atualmente, possibilitando, conseqüentemente, a mensuração do grau de desenvolvimento das drenagens e a influência de perturbações tectônicas.

2.3.1 Materias

Este trabalho se baseou em dados de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 metros, obtidos do Projeto TOPODATA (VALERIANO *et al.*, 2009) e na base hidrográfica do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM (2012). As análises dos dados geológicos e tectônicos da área tiveram como base os mapas do Projeto Espinhaço (COMIG, 1996) e da CPRM/CPMTC (2011), ambos na escala de 1:100.000. Também foram utilizadas Cartas Topográficas digitalizadas em escala de 1:100.000 (IBGE, 1978), para interpretações de relevo e localizações.

2.3.2 Métodos

2.3.2.1 Hierarquização fluvial

A hierarquia fluvial consiste no processo de se estabelecer uma classificação de cursos de água, levando em consideração o seu ordenamento em uma rede de drenagem na bacia hidrográfica. Pesquisadores como Horton (1945), Strahler

(1952) e Shreve (1966) propuseram métodos para a classificação da rede de drenagem.

Para esta pesquisa foi adotado o método proposto por Strahler (1952), pois ele permite melhor comparação entre bacias com números totais diferentes de rios, reunindo-os em classes semelhantes. Dessa maneira, é possível estabelecer comparações entre segmentos distintos da rede de drenagem (STRAHLER, 1952). Sua classificação considera os menores canais, sem tributários, como de primeira ordem, estendendo desde a nascente até a confluência; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem e só recebe afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber tributários de ordens inferiores, e assim sucessivamente.

2.3.2.2 Densidade de Drenagem (Dd)

Este índice, proposto por Horton (1945), correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia hidrográfica, sendo que, valores elevados da Dd são indicativos indiretos do grau também mais elevado de dissecação do relevo elaborado pela atuação fluvial, decorrente de fatores como; declividade, presença de material subsuperficial pouco permeável, baixa densidade da cobertura vegetal, fatores climáticos, entre outros (FONSECA e AUGUSTIN, 2014). O seu cálculo pode ser realizado conforme a seguinte fórmula:

$$Dd = \frac{L_t}{A}$$

Onde, Dd é a densidade da drenagem, L_t , o comprimento total dos canais e A é a área da bacia.

A Densidade de drenagem foi gerada em ambiente SIG, no ArcGis 10.1, os dados lineares da rede de drenagem foram transformados em dados pontuais, que em seguida, foram espacializados com o auxílio de uma ferramenta geoestatística, o estimador de densidade de Kernel, o qual permite a análise da dispersão ou concentração de um fenômeno espacial por meio de um raio de abrangência.

2.3.2.3 Índice de Concentração da Rugosidade (ICR)

O ICR foi proposto por Sampaio (2008) e melhor discutido por Sampaio e Augustin (2014). Este índice adota como referencial de análise a distribuição espacial (dispersão/concentração) da declividade, utilizando-se, de valores indiretos da rugosidade, a partir da análise da repetição dos valores de declividade por unidade de área (SOUZA e SAMPAIO, 2010).

A declividade foi realizada a partir do MDE, com a utilização da função *Slope*, do ArcGis 10.1, gerando uma matriz onde cada pixel armazena um valor específico. Essa matriz é em seguida transformada em um arquivo de pontos para a aplicação do estimador de densidade de Kernel, o qual espacializa todos os valores do índice.

Segundo Fonseca e Augustin (2014), esse índice evidencia a eficiência do entalhe da drenagem e sua capacidade erosiva na elaboração do relevo na bacia. Souza e Sampaio (2010) utilizaram o ICR 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, e concluíram que o ICR constitui uma ferramenta muito interessante para construção de um padrão cartográfico e geomorfológico de representação do relevo.

2.3.2.4 Extração dos lineamentos

Neste trabalho consideramos a definição de O'Leary *et al.* (1976) para lineamentos, o que ele caracteriza como uma feição mapeável na superfície terrestre, linear, retilínea ou suavemente encurvada. Os lineamentos refletem fenômenos de sub-superfície associados a questões estruturais herdadas.

Geralmente, a identificação/mapeamento de lineamentos estruturais é realizada de modo visual a partir de vetorização, visto que as feições no terreno ocorrem de forma complexa, e a sua extração automática é muito difícil de ser realizada de forma eficiente. Por isso, o mapa de lineamentos morfoestruturais foi obtido por meio da interpretação e vetorização de feições retilíneas (cristas alinhadas, fundos de vale e drenagens) no MDE sombreado e iluminado sob diferentes azimutes (315° e 45°), seguindo as propostas de autores como Roldan *et al.*

(2010) e Chamani (2011). Para gerar esse relevo sombreado no ArcGis foi utilizada a ferramenta *Hillshade* da extensão *3D Analyst*, e sobre ele foi realizada a vetorização dos lineamentos.

2.3.2.5 Densidade de *Knickpoints*

O mapa de densidade de *Knickpoints* foi produzido a partir da ferramenta *Knickpoint Finder* (SALAMUNI *et al.*, 2013; QUEIROZ *et al.*, 2015), que se trata de um *software* que funciona de maneira acoplada ao ArcGis, cuja finalidade é buscar locais onde há quebras de relevo em segmentos de drenagens. Uma vez que, segundo Bishop *et al.* (2005), *Knickpoint* são rupturas de declive capazes de criar anomalias de relevo em perfis longitudinais de canais fluviais.

Segundo Salamuni *et al.* (2013), o *software Knickpoint Finder* foi criado com base no IH, e busca pontos que caracterizam rupturas no terreno, de forma automática, a partir de imagens *raster* que possuam dados altimétricos, de onde a drenagem tridimensional é obtida para a análise do IH. Para isso foi utilizado dados topográficos do MDE com resolução espacial de 30 metros.

O resultado é uma malha de pontos que indicam as quebras de declive no relevo (*Knickpoint*), que segundo Bishop *et al.* (2005), são advindos de desequilíbrios, que podem estar ligados às diferenças litológicas, erosão diferencial, brusca mudança de nível de base, ou ainda pela neotectônica local.

À malha de pontos, foi aplicado o estimador de densidade de Kernel para a espacialização das zonas com maior adensamento de *knickpoints* e uma melhor visualização das rupturas de relevo, bem como a integração com outras variáveis analisadas. Foram produzidos dois mapas de densidade de *knickpoints*, um espacializando a densidade de todos os *knickpoints* por área, considerando um raio de 2000 metros de abrangência e outro espacializando os *knickpoints* levando em consideração uma ponderação pelos valores do IH regional.

2.3.2.6 Índice de Hack (IH)

Este índice proposto por Hack (1973) trata da relação entre a declividade e a extensão do canal fluvial em perfis longitudinais de rios, sendo chamado de SL

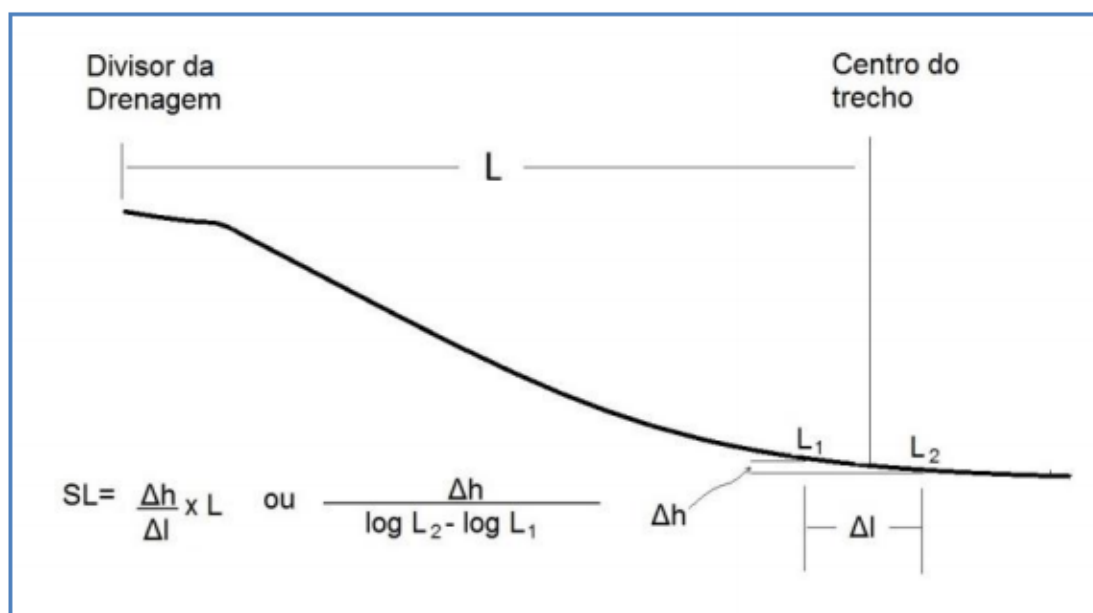
ou IH. É também conhecido no Brasil como Relação Declividade-Extensão (RDE) (ETCHEBEHERE *et al.*, 2004), consiste na seguinte fórmula:

$$SI = \frac{\Delta H}{\Delta L} * L$$

Sendo SL o índice (Declividade-Extensão), ΔH a variação altimétrica do segmento, ΔL a projeção horizontal do trecho a ser estudado e L, o comprimento do ponto mais a jusante do trecho estudado à cabeceira da bacia em linha reta (HACK, 1973). Ele pode também ser calculado pela equação simplificada, como pode ser observado na Figura 2.2, a qual foi utilizada neste trabalho.

$$SL = \frac{\Delta H}{\log_e \Delta L}$$

Figura 2.2 - Representação esquemática do cálculo do Índice de Hack



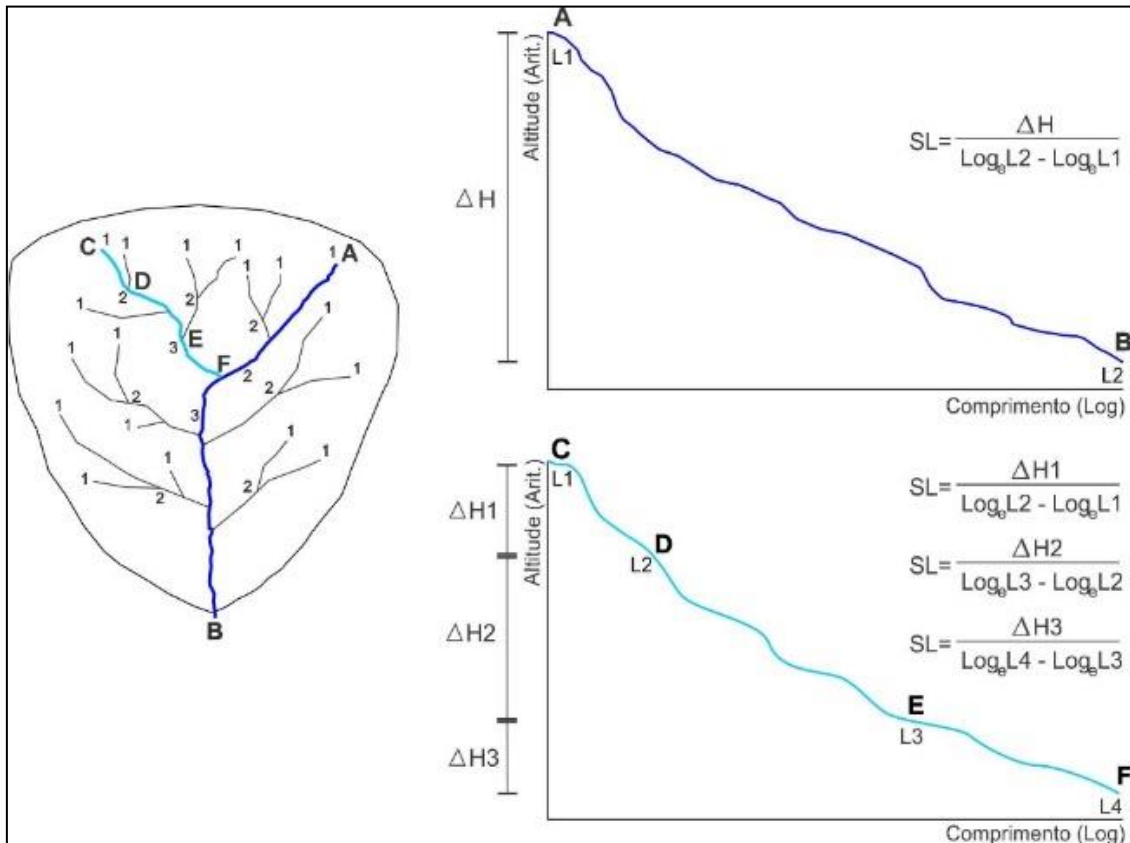
Fonte: Modificado de Hack (1973)

Foram realizados cálculos do IH para toda a extensão de um curso fluvial (IH regional) e para segmentos de rio hierarquizados (IH local), ambos utilizando como base o MDE para calcular a amplitude altimétrica.

Para o cálculo do IH regional considera-se a amplitude altimétrica total entre a cota da cabeceira e a cota da foz, bem como o logaritmo natural da extensão total do mesmo, conforme sugerido por Etchebehere *et al.* (2004), Fonseca (2010) e Fonseca e Augustin (2014).

Para o cálculo do IH local foi realizado num primeiro momento a hierarquização fluvial segundo Strahler (1952), em seguida calculou-se a amplitude altimétrica por segmento hierarquizado, bem como o logaritmo natural da extensão do segmento hierarquizado do rio, conforme pode ser visto na Figura 2.3.

Figura 2.3: Representação esquemática do cálculo do índice de Hack, segundo segmento hierarquizado. A-B representa o cálculo através da extensão total do rio e C-F representa o cálculo através dos segmentos do rio hierarquizados.



Os cálculos do IH foram realizados em ambiente ArcGis, na tabela de atributos, utilizando as ferramentas *Calculate Geometry* e *Field Calculator*. Os valores calculados para este índice foram plotados na metade do traçado de cada drenagem (ETCHEBEHERE *et al.*, 2004 e FONSECA, 2010), afim de possibilitar a aplicação de métodos de estatística espacial do índice em questão e utilizando o interpolador IDW (*Inverse distance weighted*) para espacializar as informações.

Todos os índices expostos neste trabalho tiveram seus valores normalizados (0 a 1), e divididos em cinco classes através do método de quebras naturais do

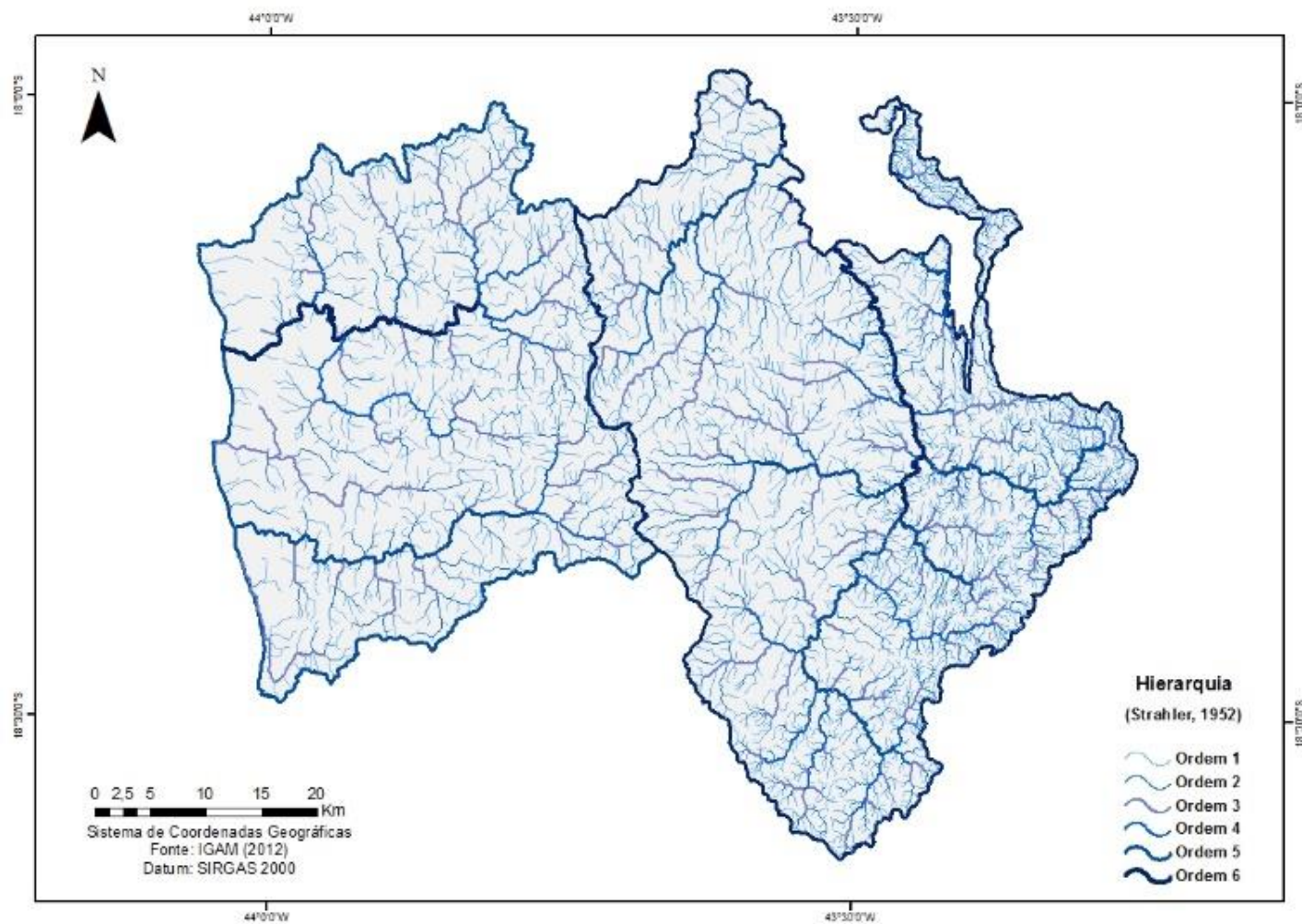
ArcGis 10.1, afim de manter um padrão para que fosse possível realizar as devidas comparações entre os diferentes índices.

2.4 Resultados e Discussões

O local de estudo contempla uma porção da bacia Pardo que possui área de 1.387 km², e uma porção da bacia Alto Jequitinhonha com área de 1.848 km². Ambas as áreas possuem seus rios principais com a mesma ordem hierárquica 6, sendo eles; o rio Pardo Grande e o rio Jequitinhonha, entretanto as suas direções de desenvolvimento são distintas, o rio Pardo Grande se desenvolveu no sentido E-W (Figura 2.4), assim como muitos rios desta área, que conforme Augustin *et al.* (2011) são controlados por falhas transcorrentes e intrusões de rochas metabásicas. O rio Jequitinhonha seguiu a direção S-N (Figura 2.4), possivelmente condicionado pelas feições herdadas do evento Brasileiro (600 - 520 Ma) que gerou dobras, falhas, fraturas e lineamentos (ALMEIDA ABREU, 1995). Há grande número de rios que também possuem direção N-S, que segundo Augustin *et al.* (2011) seguem condicionados por grandes eixos dobrados de sinclinais e anticlinais.

Há uma proporcionalidade relativa entre essas porções das bacias, no que se refere ao número de rios de hierarquias superiores pela área, entretanto quando se trata dos cursos de ordens hierárquicas 1 (nascentes) e 2, a área da bacia Alto Jequitinhonha possui uma proporção bem maior, principalmente distribuídos mais a leste, como pode ser observado na Figura 2.4. Isto indica maior energia nesta bacia, pois valores elevados da Dd são indicativos indiretos do grau também mais elevado de dissecação do relevo pela erosão fluvial, decorrente de fatores como declividade, presença de material subsuperficial pouco permeável, baixa densidade da cobertura vegetal, fatores climáticos, entre outros (FONSECA e AUGUSTIN, 2014).

Figura 2.4: Hierarquização Fluvial da área de estudo, segundo Strahler (1952)



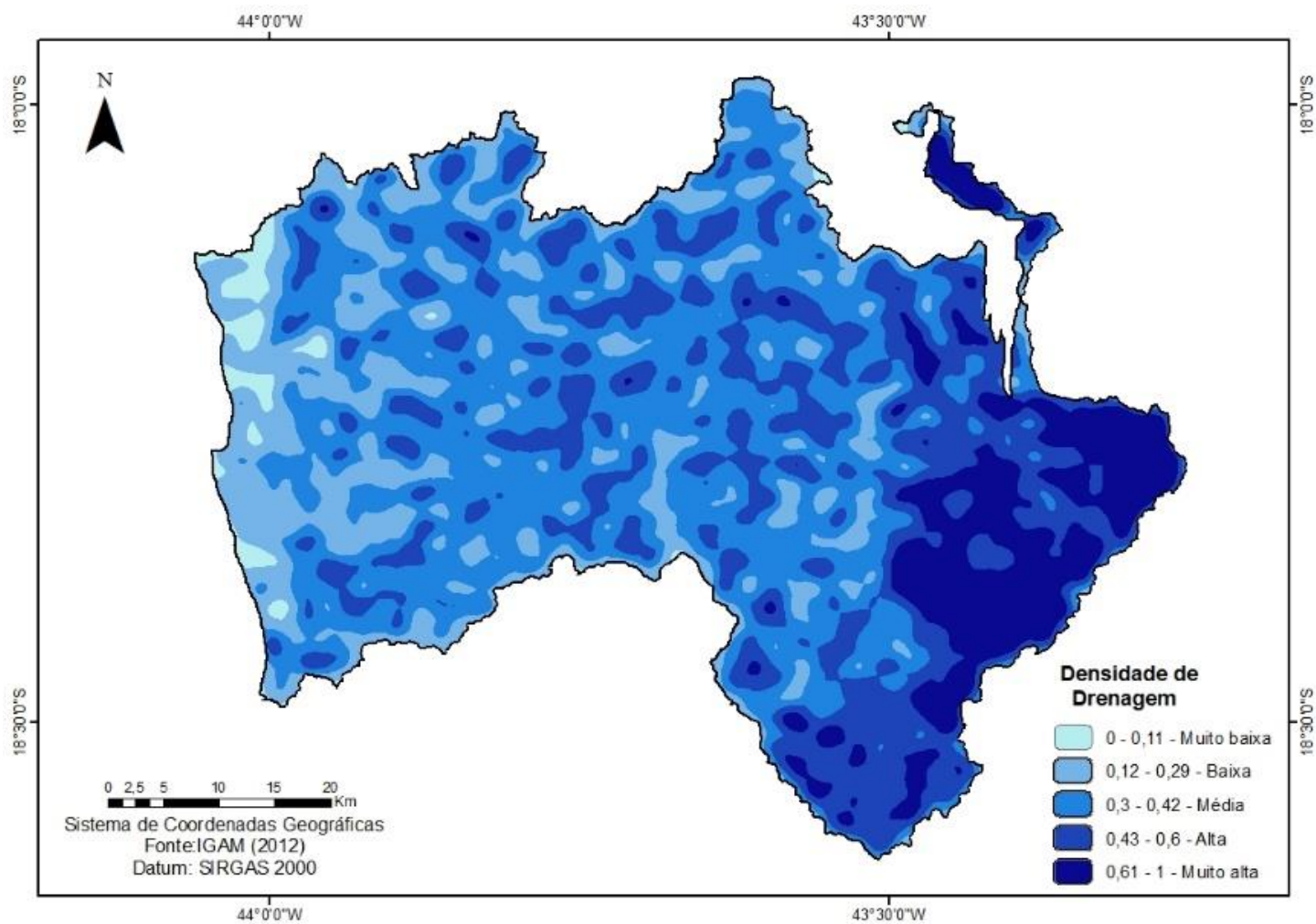
Para Park (1977), os valores de densidade de drenagem refletem o clima, mas, o tipo de rocha é responsável por detalhes no padrão de distribuição espacial. Para Bauer (1980) a densidade do sistema hidrográfico é considerada um parâmetro muito utilizado na evolução quantitativa das formas e da dinâmica de uma bacia fluvial, isto é, a composição litológica e o clima determinam as características de evolução e transformação do modelado do relevo.

Essas áreas das bacias por se tratarem de um mesmo ambiente climático e por serem relativamente homogêneas do ponto de vista litológico, representam um comportamento hidrológico definido pelos seus níveis de base, ou pelas suas estruturas geológicas (lineamentos, acamamentos, falhamentos, fraturas, por exemplo), imprimindo a capacidade de infiltração e de formação de canais superficiais.

Os resultados da Dd, levando em conta os rios de todas as ordens hierárquicas, também evidenciou a grande quantidade de rios na área leste da bacia do Jequitinhonha (Figura 2.5). Este parâmetro permite a individualização de áreas anômalas de alta ou baixa Dd, que podem estar refletindo controle tectônico (HORTON, 1945). Entretanto quando se observa a Figura 2.10, percebe-se a presença de lineamentos estruturais em quase toda a área, não servindo de base para interpretar que as áreas de alta Dd correspondem as áreas de concentração de lineamentos.

Como a dinâmica hidrológica responde em grande parte pela recarga e manutenção dos níveis freáticos (AYOADE, 1986), ela é dependente da maneira como os processos de infiltração e distribuição da água de chuva ocorrem, e da interferência do relevo nesses processos. A área leste da bacia do Alto Jequitinhonha com alta Dd reflete uma retomada erosiva das formas de relevo, o que pode ser interpretado por sua maior proximidade com o mar (nível de base geral), uma vez que, a bacia do rio Pardo tem como seu nível de base local a bacia do rio São Francisco.

Figura 2.5: Mapa de densidade de drenagem da área de estudo



Outra possibilidade, é que a borda oeste do Supergrupo Espinhaço se comporte como um possível nível de base para a bacia do Pardo, uma vez que, sua estrutura pode sustentar um nível de base local, não permitindo a saída de material que se acumula nas grandes áreas aplainadas dessa bacia, como pode ser observado na Figura 2.6. Feições como essas, de extensas áreas aplainadas circundadas por afloramentos, são recorrentes em toda a bacia Pardo, muito diferentes das feições encontradas na bacia Alto Jequitinhonha.

Figura 2.6: Área aplainada na bacia do rio Pardo



Fonte: Milagres (2015)

Valores elevados do índice de Dd são indicativos indiretos do grau mais elevado de dissecação do relevo, elaborado pela atuação fluvial (FONSECA e AUGUSTIN, 2014). Deste modo, ele é altamente correlacionado com a relação de declividade (SCHUMM, 1956; HADLEY e SCHUMM, 1961), assim, podemos associa-lo também ao ICR que expressa a distribuição espacial da declividade e consequentemente pode ser utilizado para interpretações acerca da evolução das formas de relevo e a contribuição da rede de drenagem para isso.

O ICR evidencia um maior grau de dissecação na bacia do Alto Jequitinhonha, principalmente a nordeste, mas também apresenta valores altos a oeste da área de estudo (Figura 2.7), a qual contempla as influências de uma área muito

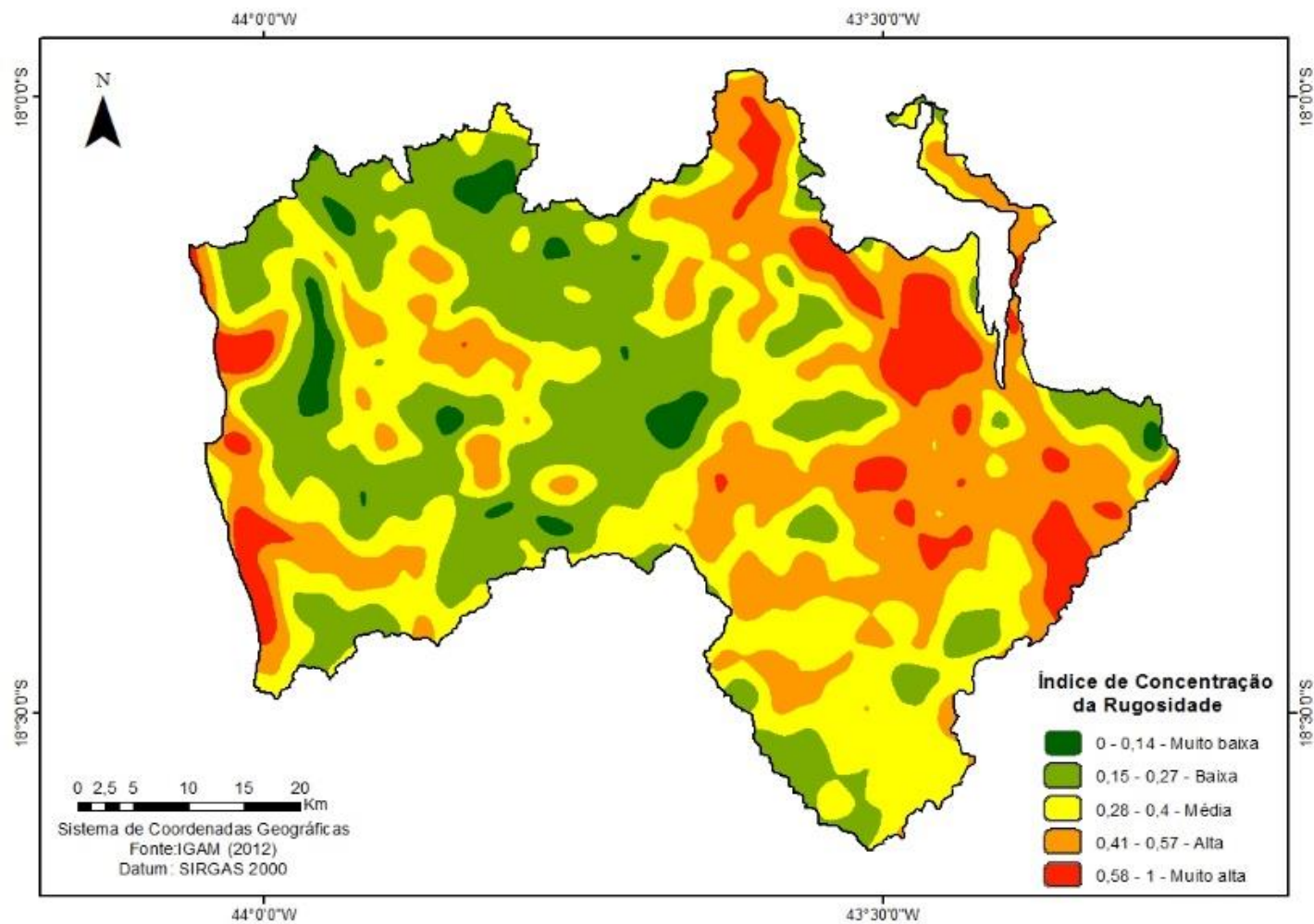
escarpada da bacia Pardo. Essa escarpa separa a área de rochas siliciclásticas do Supergrupo Espinhaço das rochas carbonáticas do Grupo Bambuí.

Esta quebra no relevo, influencia a declividade a oeste da área de estudo, o que conseqüentemente produz um alto ICR, sendo uma área de comportamento bem distinto da área leste, a qual possui altos índices de Dd que recortam o relevo e trazem alto grau de dissecação e rugosidade ao terreno.

Os relevos residuais elevados (afloramentos e relevos em crista), muito presentes também na porção oeste, por deterem maior declividade em suas encostas, podem evidenciar a influência do relevo na drenagem, concentrando uma maior densidade de drenagem. Evidências que corroboram para a constatação da grande influência das formas de relevo sobre o estabelecimento da rede de drenagem em determinado local.

Na bacia do rio Pardo é comumente encontrado material deposicional da alteração dos afloramentos, depositado em grandes e pequenas áreas aplainadas, que ainda não foi retirado deste sistema pela rede de drenagem. Na medida em que se avança para o interior da bacia do Alto Jequitinhonha, a drenagem torna-se ao que tudo indica mais eficiente (Figuras 2.5 e 2.7), formando vales mais profundos, evidenciando um relevo muito dissecado. Augustin *et al.* (2011) caracterizou este relevo como erosivo retrabalhado, por se tratar de um relevo com altos valores de declividade em resposta à incisão fluvial que atua na retirada de deposições realizadas também por alterações de afloramentos.

Figura 2.7: Mapa do Índice de Concentração da Rugosidade da área em estudo



As Figuras 2.8 e 2.9 representam bem esta diferença no modelado do relevo das bacias, a Figura 2.8 representa o relevo mais suave da bacia Pardo, enquanto a Figura 2.9 mostra o relevo mais dissecado da bacia do Alto Jequitinhonha.

Figura 2.8: Relevo da bacia do rio Pardo



Fonte: Milagres (2015)

Figura 2.9: Relevo da bacia do Alto Jequitinhonha



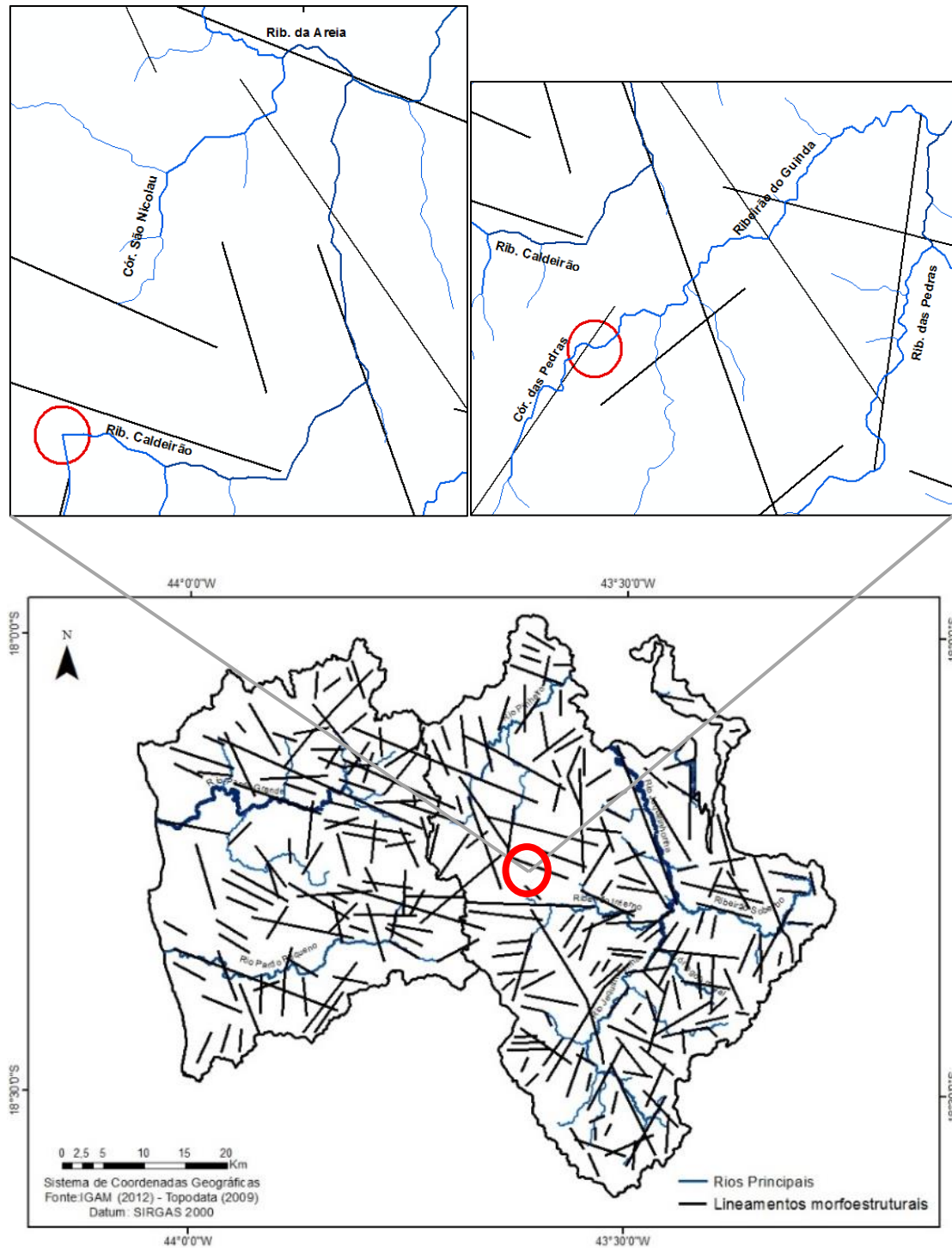
Fonte: Milagres (2015)

A rede de drenagem de toda a área apresenta um padrão condicionado por estruturas geológicas. Segundo Shreve (1966) os sistemas de drenagem tendem a assumir comportamentos estáticos aleatórios, a menos que alguma perturbação (lineamentos estruturais) possa condicionar trajetórias mais facilmente erodíveis. De acordo com Howard (1967), as anomalias de drenagem podem ser representadas por canais retilíneos, ocorrência localizada e abrupta de curvas meândricas, curvas e voltas abruptas na drenagem, padrões estes, que são recorrentes nas áreas em estudo (Figura 2.10). É possível observar padrões retangulares de drenagem e vários cotovelos, todos evidenciando capturas de rios por estruturas (falhas, fraturas, lineamentos) em ambas as bacias.

Abreu (1982) descreveu algumas capturas de rios por falhamentos locais no Planalto de Diamantina, os quais, Saadi (1995) atribuiu a um falhamento de expressão regional. Segundo Abreu (1982), o alto ribeirão do Caldeirão atingia o ribeirão da Areia, através do córrego São Nicolau e o córrego das Pedras era afluente do ribeirão do Caldeirão. Hoje o ribeirão do Caldeirão sofre duas inflexões e desagua diretamente no ribeirão da Areia e o córrego das Pedras desagua no ribeirão do Guinda (Figura 2.10). Todos eles estão localizados na bacia do Jequitinhonha, próximos ao interflúvio, e tiveram suas capturas ligadas a direção NW.

Na Figura 2.10 pode-se observar alguns rios seguindo um padrão linear controlados por lineamentos. Nos dois quadros em destaque é possível ver os rios que segundo Abreu (1982) tiveram suas trajetórias mudadas. O destaque em vermelho mostra onde provavelmente estes cursos tiveram sua rota principal desviada. No caso do ribeirão Caldeirão é evidente seu comportamento estrutural com “cotovelos” e trajetórias retilíneas evidenciando um alto controle estrutural nesta área. No córrego das Pedras é possível perceber seu condicionamento através de uma estrutura, o que pode ser observado também no córrego da Areia e no ribeirão das Pedras. Os quadros destacam uma realidade que está presente em toda área estudada, claro que em graus distintos de condicionamento.

Figura 2.10: Mapa de lineamentos evidenciando a rede de drenagem e seus condicionamentos estruturais. Os círculos em vermelho representam os locais que os cursos fluviais possivelmente tiveram suas trajetórias alteradas.

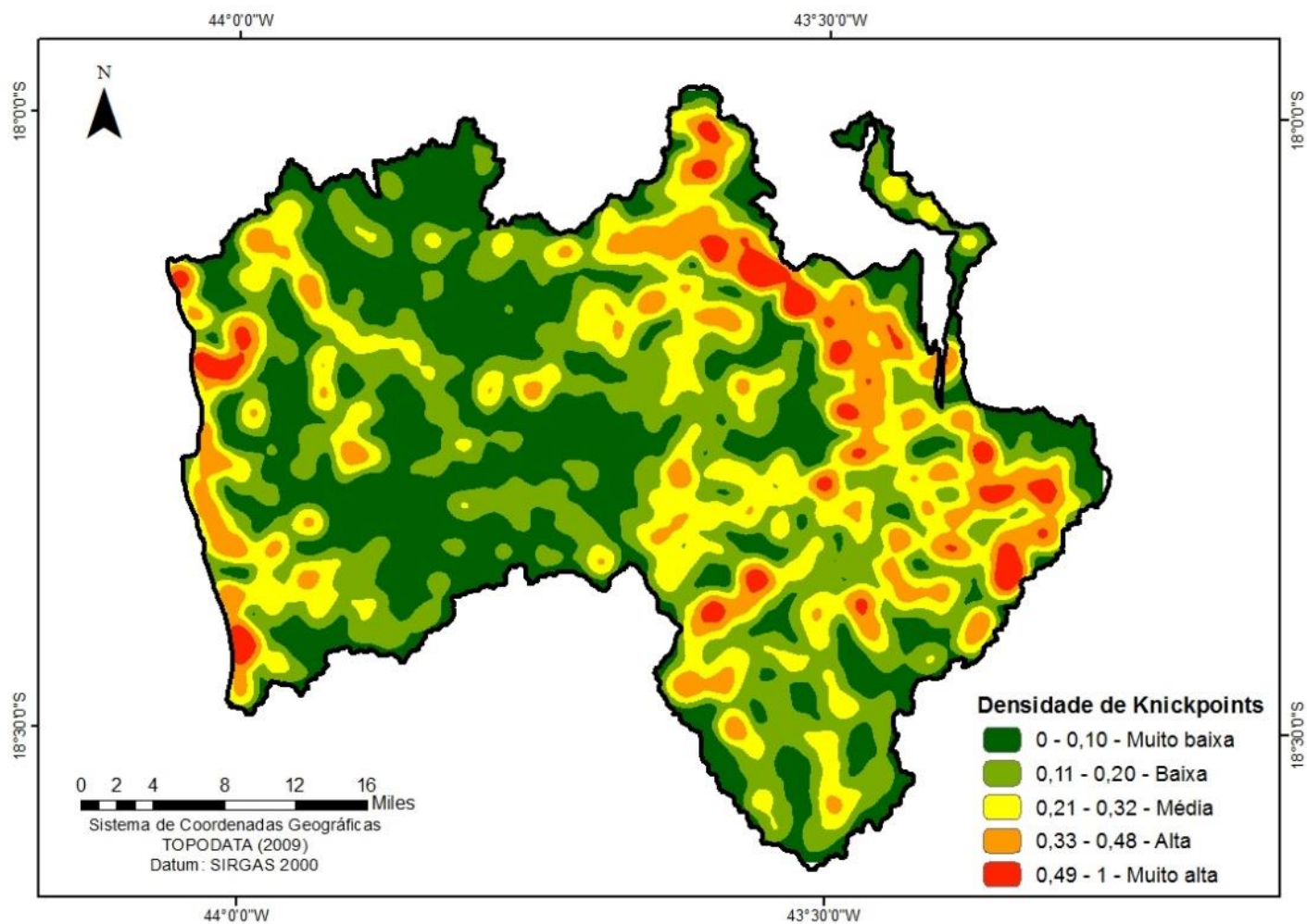


A identificação do controle estrutural das feições geomorfológicas é uma das principais motivações dos estudos morfoestruturais, morfotectônicos e neotectônicos, que juntamente com parâmetros morfométricos e geológicos podem propiciar um entendimento dos processos formadores do relevo (BISHOP *et al.*, 2005).

Na área estudada os fatores estruturais tornam-se ainda mais latentes, haja visto um forte controle estrutural, dado principalmente pelo Evento Brasileiro, que influenciou diretamente os processos modeladores das formas de relevo nas bacias estudadas, sendo que a bacia do Alto Jequitinhonha sofreu maiores deformações, tendo sido muito recortada por falhas e grandes cavalgamentos (UHLEIN, 1991; KNAUER, 1990; DUSSIN e DUSSIN, 1995; RENGER e KNAUER, 1995; KNAUER, 2007; CHEMALE JR. *et al.*, 2011), também possui maior concentração de *knickpoints* (Figura 2.11), os quais podem estar associados a estas zonas de fraqueza herdadas do Brasileiro, com posteriores reativações ou não.

De acordo com Crosby e Whipple (2006), *knickpoints* estão associados com a dinâmica de ajustamento de canais fluviais que acompanham alterações climáticas e tectônicas. Os *knickpoints* são vistos como níveis de reajustes locais, que após um aumento de energia, favorece uma retomada erosiva, regulando o entalhe do vale a montante (Phillips *et al.*, 2010). É evidente a correspondência espacial entre a densidade de *knickpoints* e o ICR (Figuras 2.11 e 2.7), que possibilita confirmar que a densidade de quebras no relevo ou “degraus” (*knickpoints*), possui relevante significado geomorfológico ao indicar processos de retomada erosiva e aumento na intensidade de dissecação do relevo, sendo de grande importância para os estudos de evolução da paisagem.

Figura 2.11: Mapa de Densidade de *Knickpoints*



A concentração de *knickpoints* na bacia do Alto Jequitinhonha é muito mais expressiva que na bacia Pardo. A bacia Pardo, quando analisada em toda a extensão, indica a presença de poucos *knickpoints*, apontando uma baixa ocorrência de rupturas do relevo, o que também afirma tratar-se de uma área com grandes compartimentos aplainados, circundados por afloramentos, como já discutido anteriormente. A maior concentração de *knickpoints* ocorre na sua borda oeste (Figura 2.11), possivelmente por causa da influência do contato litológico dos quartzitos com os carbonatos do Grupo Bambuí, bem marcado por grandes escarpas.

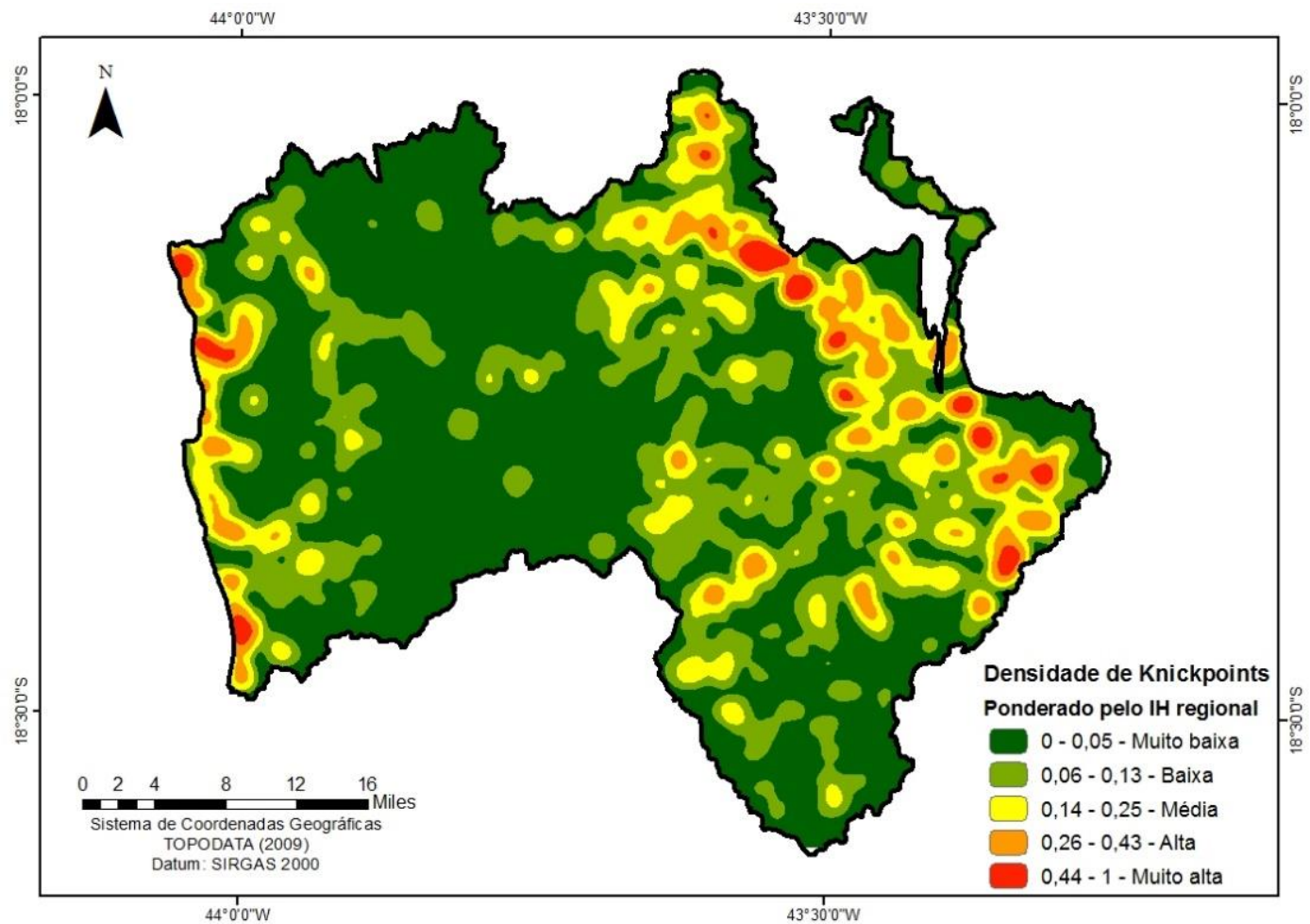
A ocorrência de maior densidade de *knickpoints* no Alto Jequitinhonha corrobora os resultados de Fonseca e Augustin (2014), no sentido de que nesta porção da bacia há maior energia e, conseqüentemente, uma intensidade maior de processos tanto de encostas, quanto fluviais, favorecendo maior dissecação do relevo, que é bem distinta entre as duas bacias.

Ao analisar a densidade de *knickpoints* ponderada pelo IH regional ou índice de Hack calculado para toda a extensão do rio (Figura 2.12) pode ser observado grande semelhança com o mapa do IH regional (Figura 2.13), confirmando um caráter mais energético na bacia do Alto Jequitinhonha.

Também é possível perceber que na bacia Pardo há poucos *knickpoints*, atestando as poucas quebras no relevo destas áreas, as quais são mais suaves, com presença de extensas áreas aplainadas, com mantos de intemperismo de espessuras variando de centímetros a metros (ROCHA, 2011), enquanto que a leste (bacia do Alto Jequitinhonha) o relevo é muito dissecado, com presença de poucas superfícies aplainadas e mantos de intemperismo pouco profundos (ROCHA, 2011).

A grande semelhança entre a densidade de *knickpoints* ponderada pelo IH total (Figura 2.12) e o mapa do IH regional (Figura 2.13) atesta que a variável litoestrutural exerce grande influência na área em estudo, caracterizando que as áreas de alta energia sofrem influências de um conjunto de variáveis e não apenas do comportamento do rio. Uma vez que, estes rios são condicionados por variáveis como; litologia, estruturas geológicas, clima e vegetação.

Figura 2.12: Mapa de Densidade de *Knickpoints* ponderado pelo IH regional



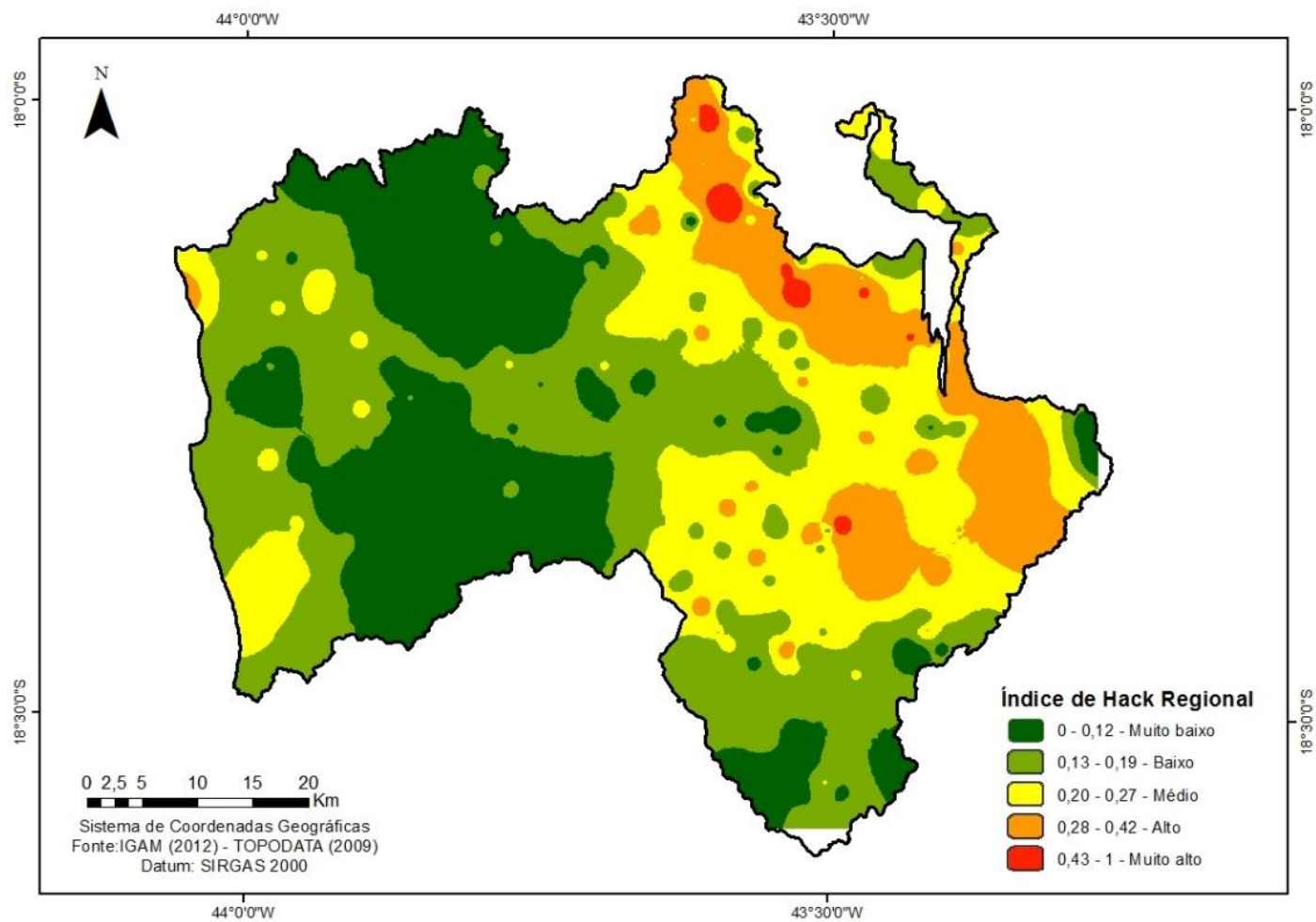
A análise comparativa do cálculo do IH, utilizando unidades espaciais diferentes, para a área em estudo, evidenciou resultados distintos (Figuras 2.13 e 2.14), indicando que o uso de segmentos hierarquizados alcançou um resultado mais ajustado às variações de energia da rede de drenagem, e conseqüentemente às variações estruturais e morfológicas em escala local. Por outro lado, o resultado do IH para todo o comprimento de cada rio mascarou a variabilidade energética local, mas não foi totalmente discrepante em relação ao IH local, preservando uma correlação espacial com ele e com os índices de Dd, ICR e densidade de *knickpoints*.

A Figura 2.13 mostra o resultado do procedimento de cálculo do IH que utiliza o comprimento total do rio, onde é possível perceber a espacialização desse índice delimitando grandes compartimentos de valores de alto e baixo IH, apresentando-o por grandes áreas de influência energética.

Tais compartimentos são evidenciados principalmente na diferença energética das duas bacias, onde pode ser observado grandes áreas de baixa energia na bacia Pardo. Augustin *et al.* (2011) classificou as áreas entre as cabeceiras do rio Pardo Grande e do rio Pardo Pequeno como áreas erosivas remanescentes, as quais correspondem a extensos platôs pouco recortados por intrusões de rochas metabásicas, o que pode responder por sua evolução mais homogênea, no qual se destacam os afloramentos de quartzito, intercalados por deposições de materiais arenosos. Já na bacia do Jequitinhonha onde podem ser observados altos valores energéticos, Augustin *et al.* (2011) classificou como áreas modeladas pela incisão vertical da rede de drenagem em planos de falhas e fraturas, que formam profundas gargantas em quartzitos, como exemplo, o rio Jequitinhonha, o ribeirão do Inferno e o córrego Rapadura.

Dessa forma, podemos assumir que os valores de Dd, ICR e densidade de *knickpoints* também evidenciaram o mesmo resultado, uma vez que, representaram principalmente uma maior taxa de dissecação na bacia do Alto Jequitinhonha do que na bacia do Pardo. O que indica também maior energia fluvial para incidir verticalmente no relevo e o torna-lo mais dissecado.

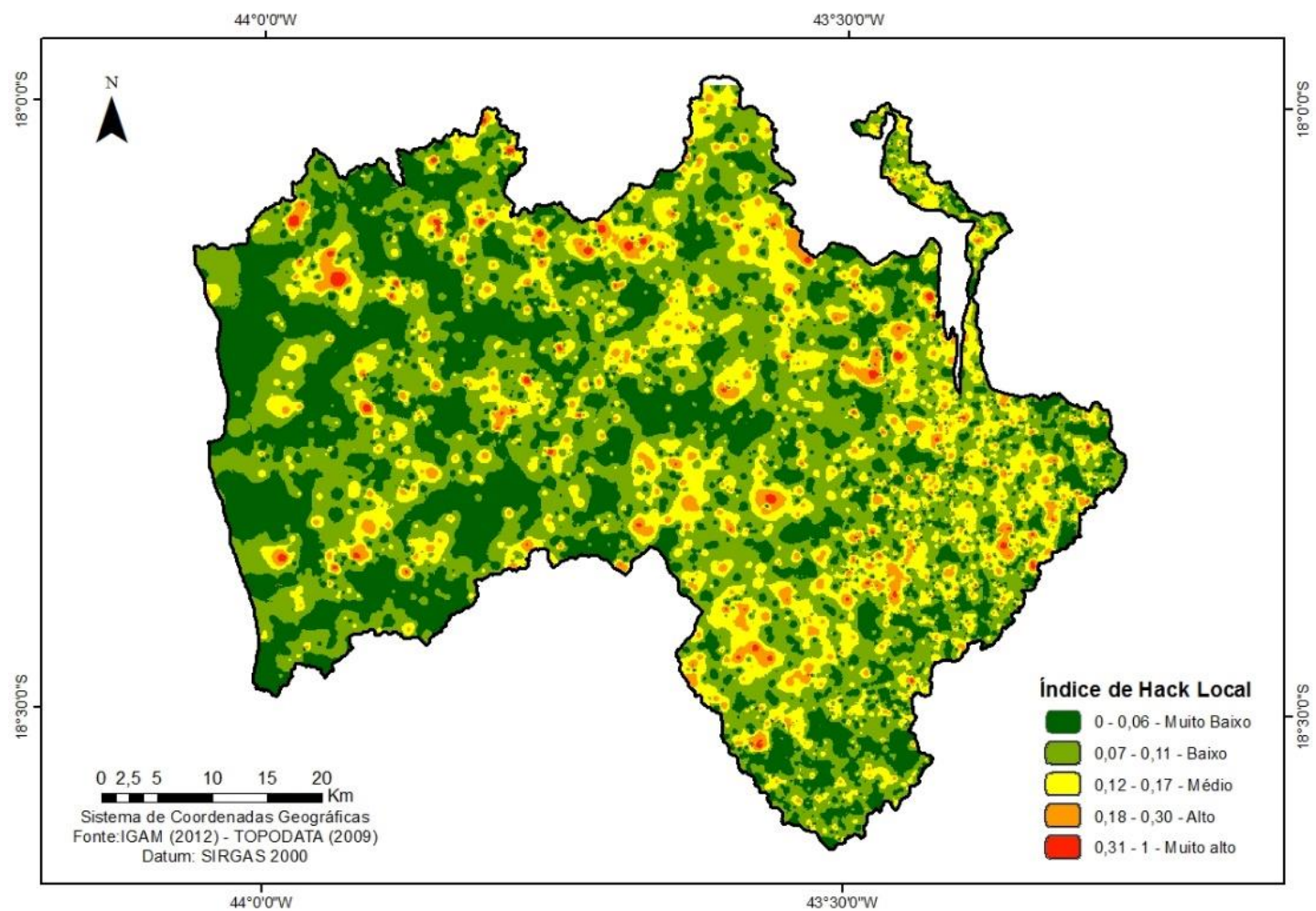
Figura 2.13: Índice de Hack Regional



Na Figura 2.14 foi adotado o procedimento de cálculo que leva em conta a hierarquização fluvial, o qual possibilitou obter uma riqueza de detalhes maior acerca da espacialização do IH. É possível observar que a leste (bacia do Alto Jequitinhonha) existe uma concentração maior de valores de IH elevados, entretanto, é nítido que na bacia Pardo também existem vários locais com alto IH, o que no cálculo do IH regional não foi possível perceber, uma vez que a dimensão do canal de drenagem analisado mascarou as variações locais da energia da rede de drenagem. Dessa maneira, pode-se afirmar que o cálculo do IH local permite uma avaliação mais ajustada da variabilidade energética dos canais de drenagem, bem como os efeitos locais da variação litológica e estrutural.

Pode ser observado uma maior correlação do IH local com o mapa de lineamentos, onde conclui-se que o IH local se mostra mais sensível ao controle exercido por lineamentos (Figuras 2.10 e 2.14). Também podem ser melhor analisadas as áreas aplainadas da bacia Pardo, no qual é possível observar a variação das áreas de baixa energia (aplainamentos) e as áreas de alta energia, possivelmente ligadas aos grandes afloramentos.

Figura 2.14: Índice de Hack local



2.5 Considerações Finais

Os resultados apresentados pela aplicação do IH indicam que o uso de segmentos de drenagem hierarquizados proporciona respostas mais ajustadas às variações locais da energia dos canais, evidenciando a sua eficiência, principalmente para pesquisas em escala micro, onde o uso do comprimento total do rio pode não obter respostas ajustadas de energia.

O cálculo do IH tomando como padrão o segmento hierarquizado pode ser de grande valia para interpretações da evolução geomorfológica do relevo. Ele permite estabelecer associação com a base litoestrutural, e fornece elementos analíticos que possibilitam agilização dos procedimentos de trabalho de campo. Seu cálculo em SIG permite a formação de um banco de dados e informações para a interpretação geomorfológica das formas do relevo e dos fatores condicionantes envolvidos na distribuição diferenciada dessas formas.

A espacialização do IH foi de fundamental importância para uma melhor observação da dinâmica energética da área. Além de proporcionar a comprovação visual das discrepâncias entre o comprimento do rio a ser utilizado no IH. A interpolação dos valores pontuais de todos os índices resultou em uma superfície com variação contínua no espaço, este procedimento geoestatístico permitiu espacializar os valores para toda a área, facilitando e otimizando a análise.

Todos os índices utilizados juntamente ao IH foram essenciais para comprovar a existência de diferentes padrões de formas de relevo em ambas as bacias, sendo a bacia Pardo composta por áreas aplainadas e a bacia do Alto Jequitinhonha por áreas muito dissecadas, resultantes do maior vigor energético presente nesta bacia. Conclui-se que relevos com dinâmicas energéticas diferentes também terão processos de evoluções distintas. Nesse sentido o cálculo do IH além de evidenciar a energia dos rios e bacias, também é um indicador excelente para se usar em estudos de evolução do relevo.

2.6 Referências Bibliográficas

ABREU, A.A. **Análise geomorfológica: reflexão e aplicação (Uma contribuição ao conhecimento das formas de relevo do Planalto de Diamantina – MG)**. 1982. 296 p. São Paulo, USP, Tese de Livre Docência, 1982.

ALMEIDA-ABREU P.A. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): o Rifte, a Bacia e o Orógeno. **Geonomos**. v.3, n.1, p. 1-18, 1995.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; FONSECA, B. M.; ROCHA, L. C. Mapeamento Geomorfológico da Serra do Espinhaço Meridional: primeira aproximação. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.19, n.2, p. 50-69. 2011.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. São Paulo: Difel, 1986.

BAUER, B. Drainage Density. An Integrative Measure of the Dynamics and the Quality of Watersheds. **Geomorph. N. F.**, Berlin, v. 24, n. 3, p. 261-272, 1980, Sept.

BISHOP, P.; HOEY, T.B.; JANSEN, J.D.; ARTZA, I.L. Knickpoint recession rate and catchment area: the case of uplifted rivers in Eastern Scotland. **Earth Surface Process & Landform**, v. 30, p.767-778, 2005.

BJORNBERG, A.J.S. **Contribuição ao estudo do cenozóico paulista: tectônica e sedimentologia**. 1969. 128f. Tese (Provimento do cargo de Professor) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 1969.

BRUSH, L.M.Jr. Drainage basins, channels, and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania: **U.S. Geological Survey Professional Paper**, v.282, p. 145-181, 1961.

CARLSTON C.W. Longitudinal slope characteristics of rivers of the mid-continent and the Atlantic east Gulf slopes. **International Association of Scientific Hydrology Bulletin**, v.14, n.4, p. 21-31, 1969.

CHAMANI, M.A.C. **Tectônica intraplaca e deformação sinsedimentar induzida por abalos sísmicos: O lineamento Transbrasiliano e estruturas relacionadas na província Parnaíba, Brasil**. 2011. 206 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

CHEMALE JR. F.; DUSSIN, I.A.; MARTINS, M.; SANTOS, M.N. Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). **Geonomos**, v. 19, n.2, p.173-41, 2011.

COMIG. Projeto Espinhaço. Belo Horizonte, Cia. Mineradora de Minas Gerais. (inclui 23 mapas geológicos na escala de 1:100.000), 1996. Disponível em: http://www.comig.com.br/site/content/parcerias/levantamento_aerogeofisico.asp?id=30 &idSubPrj=50&filhold=51

CROSBY, B.T., WHIPPLE, K.X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. **Geomorphology** v. 82, p.16-38, 2006.

DAVIS, W. M. The Geographical Cycle. In: **Geographical Journal of The Royal Geographical Society**, v.14, p.481-504, 1899.

DUSSIN, I.A. e DUSSIN, T.M. Supergrupo Espinhaço: Modelo de evolução geodinâmica. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.3, n. 1, p.19-26. 1995.

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 de Instituto de Geociências da USP – Séries Científica**, v.4, n.2, p.43-56, 2004.

ETCHEBEHERE, M.L.C.; SAAD, A.R.; SANTONI, G.; CASADO, F.C.; FULFARO, V.J. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do rio do Peixe, região Ocidental Paulista, mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade-Extensão) em segmentos de drenagem. **Revista Brasileira de Geociências - UNESP**, v.25, n.3, p.271-287, 2006.

FOGAÇA, A.C.C. Geologia da Folha Diamantina. In: GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; SOARES-FILHO, B.S. (coordenadores e editores). **Projeto Espinhaço em CD-ROM (textos, mapas e anexos)**. Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. 1997. 1598p.

FONSECA, B.M. **O uso do Sistema de Informações Geográficas na análise morfométrica e morfológica de bacias de drenagem na Serra do Espinhaço Meridional – MG**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Análise Ambiental), programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010.

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. **Anais...** Santiago, 2011. p. 1-12.

FONSECA, B.M.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Análise morfométrica de bacias de drenagem e sua relação com a estrutura geológica, serra do Espinhaço Meridional MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 2, p. 153-172. 2014.

GERRARD, A.J. **Rocks and Landforms**. Unwin Hyman Ltd, London, 1988, 319p.

GILBERT, G. K. Report on the Geology of the Henry Mountains. **Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region**, Department of the Interior, p.1-17, 1877.

GUEDES, I.C.; SANTONI, G.C.; ETCHEBEHERE, M.L.C.; STEVAUX, J.C.; MORALES, N.; SAAD, A.R. Análise de perfis longitudinais de drenagens da bacia do rio Santo Anastácio (SP) para detecção de possíveis deformações neotectônicas. **Revista da Universidade de Guarulhos, Geociências**, v.5, n.1, p.75-102, 2006.

HACK, J.T. Geology of the Brandywine area and origin of the upland of southern Maryland. **U.S Geol. Survey Professional Paper**, v. 267-A, p. 1-43. 1955.

HACK, J.T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. **U.S Geol. Survey Professional Paper**, v. 294-B, p. 45-97, 1957.

HACK, J.T. and YOUNG, R.S. Intrenched meanders of the North Fork of the Shenandoah River, Virginia. **U.S. Geol. Survey Professional Paper**, v. 354-A, p. 1-10. 1959.

HACK, J.T. Interpretation of erosional topography in Humid Temperate regions. **American Journal of Science**, v. 258 A, p. 80-97, 1960.

HACK, J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal of Research of the United States Geological Survey**, v.1, n.4, p.421-429, 1973.

HACK J.T. Dynamic equilibrium and landscape evolution. In: MELHORN, W.L.; FLEMAL, R.C. **Theories of Landform Development**, State University of New York Press, Binghamton, NY. p. 87–102. 1975.

HADLEY, R. F. e SCHUMM, S. A. Sediment sources and drainage-basin characteristics in upper Cheyenne River basin. **US Geol. Survey Water Supply Paper** 1531-B. 1961.

HORTON, R.E. Erosional development of streams their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, Colorado, v. 56, p. 275-370. 1945.

HOWARD, A.D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. **American Association of Petroleum Geology Bulletin**, Tulsa, v.51, n.11, p.2246-2259, 1967.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br>>. Acesso em: 10.fev.2015.

KELLER, E.A. Adjustment of drainage to bedrock in regions of contrasting tectonic framework. **Geological Society of America**, v. 9, n. 7, p.10-46, 1977.

KELLER, E.A.; ROCKWELL, T.K. Tectonic geomorphology, Quaternary chronology, and paleoseismicity. In: COSTA, J. E.; FLEISHER, P. I., eds., **Developments and applications of geomorphology**, New York, Springer-Verlag, p. 203-239, 1984.

KELLER E.A. e PINTER N. **Active tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscapes**. Prentice Hall, New Jersey, 1996, p.234.

KNAUER, L.G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.15, n.1, p. 81-90. 2007.

KNAUER, L.G. **Evolução geológica do Precambriano da porção centro leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada**. 1990. 298 f. Dissertação (Mestrado em geologia), Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, São Paulo. 1990.

KNIGHTON, A.D. **Fluvial forms and processes: a new perspective**. Arnold, London, U.K. 1998.

LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. **Geological Survey Professional Paper**. v.252. p.1-57, 1953.

MARTINS M.S, KARFUNKEL J., NOCE C.M., BABINSKI, M., PEDROSASOARES A.C., SIAL A.N., LIU D. A seqüência pré-glacial do Grupo Macaúbas na área-tipo e o registro da abertura do rifte Araçuaí. **Revista Brasileira de Geociências**, v.38, n.4, 761- 772, 2008.

MAYER, L., WENTWORTH, C.M. Geomorphic differences east and west of the Stafford fault system, northeastern Virginia. **Geological Society of America**, v.15, n.2, p.56, 1983.

McKEOWN, F.A.; JONES-CECIL, M.; ASKEW, B.L.; McGRATH, M.B.. Analysis of stream-profile data and inferred tectonic activity, Eastern Ozark Mountains region. U. S. **Geological Survey Bulletin**, n.1807, p.1-39, 1988.

MILAGRES, A.R.; AUGUSTIN, C.H.R.R.; FONSECA, B.M. Comparação entre padrões de cálculo do índice de Hack na bacia do Rio Pardo, Serra do Espinhaço Meridional, MG. **Revista Equador**, v. 4, p. 656-662, 2015a.

MORISAWA, M.E. Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, v.73, p.1025-1046, 1962.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **GSA Bulletin**, v.87, p.1463-1469, 1976.

PARK, C.C. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: an analysis and some observations. **Journal of Hydrology**, v.33, p. 133-146. 1977.

PHILLIPS, L.F.; SCHUMM, S.A. Effect of regional slope on drainage networks. **Geology**, v.15, n.9, p.813-816, 1987.

PHILLIPS, J. D., *et al* 2010, 'Origin and interpretation of knickpoints in the Big South Fork River Basin, Kentucky-Tennessee', **Geomorphology**, v.114, n.3, p. 188-198, 2010.

PRESS, F. **Para entender a Terra**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

QUEIROZ, G.L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E.R. Knickpoint finder: A software tool that improves neotectonic analysis. **Computers e Geosciences**, v. 76, p.80-87, 2015.

RENGER, F.E. e KNAUER, L.G. Espinhaço – Quo vadis? (Onde está? Aonde vai?) A evolução dos conhecimentos sobre a Cordilheira do Espinhaço Meridional em Minas Gerais entre 1979 e 1995. **Geonomos**, v.3, n.1, p.31-39. 1995.

RHEA, S. Geomorphic observations of rivers in the Oregon coast range from a regional reconnaissance perspective. **Geomorphology**, v.6, n.2, p.135-150, 1993.

ROCHA, L.C. **Desnudação geoquímica na evolução da Serra do Espinhaço Meridional - MG - Brasil**. 2011. Dissertação de Mestrado (Geografia) Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2011.

ROLDAN, L.F.; MACHADO, R.; STEINER, S.S.; WARREN, L.V. Análise de lineamentos estruturais no Domo de Lages (SC) com uso de imagens de satélite e mapas de relevo sombreado. São Paulo. **Geologia USP**, v.10, n.2, p. 57-72, 2010.

SAADI, A. A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e suas margens. **Geonomos**, v.3, n.1, p.41-63, 1995.

SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, R.E.; SILVA, P.A.H.; QUEIROZ, G.L.; SILVA, G. Knickpoint Finder: Ferramenta para a busca de geossítios de relevante interesse para o geoturismo. **Boletim Paranaense de Geociências**, v.70, p. 200-208, 2013.

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. 2008. 147 f. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.

SAMPAIO T.V.M.; AUGUSTIN C.H.R.R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a Cartografia Geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.15, n.1, p.47-60. 2014.

SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n.5, p. 597-646. 1956.

SCHUMM, S.A. River response to base level change: Implications for sequence stratigraphy. **Journal of Geology**, v.101, n.2, p. 279-294, 1993.

SEEBER, L., GORNITZ, V.M. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. **Tectonophysics**, v.92, n.4, p. 335-367, 1983.

SHREVE, R.L. Statistical Law of Stream Numbers. **The Journal of Geology**, v.74, n.1, p.17-37. 1966.

SINHA, S.K.; PARKER, G. Causes of concavity in longitudinal profiles of rivers. **Water Resources Research**, v.32, n.5, p.1417-1428, 1996.

SKLAR, L.S.; DIETRICH, W.E. Implications of the saltation-abrasion bedrock incision model for steady-state river longitudinal profile relief and concavity. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.33, n.7, p.1129-1151, 2008.

SORDI, M.V.; SALGADO, A.A.R.; PAISANI, J.C. Evolução do relevo em áreas de tríplice divisor de águas regional - O caso do planalto de Santa Catarina: Uma análise morfoestrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.16, n.4, p.579-592, 2015.

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. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. 2010, Recife-PE. **Anais**. P. ?.

SOUZA, D.V.; MARTINS, A.A.; FARIA, A.L.L. Aplicação do índice de Hack (SL) a um trecho do rio Zêzere, Portugal. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n.1, p. 23-28. 2011.

STRAHLER, A.N. Dynamic basis Geomorfology. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.9, p. 923-938. 1952.

THOMAS, M.F. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates**. Macmillan, London, 1974, 329p.

TROIANI, F.; DELLA SETA, M. The Use of the Stream Length-Gradient Index in Morphotectonic Analysis of Small Catchments: A Case Study from Central Italy. **Geomorphology**, v.102, n.1, p.159-168, 2008.

UHLEIN, A. **Transição cráton-faixa dobrada**: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais. Aspectos estratigráficos e estruturais.1991. 295f. Tese (Doutorado em geologia), Universidade Estadual de São Paulo – USP. 1991.

VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F.; ALBUQUERQUE, P.C.G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal, RN. **Anais**. São José dos Campos, SP : INPE, 2009. Artigos, p. 1-8. CD-ROM.

VOLKOV, N.G.; SOKOLOVSKY, I.L.; SUBBOTIN, A.I. Effect of recent crustal movements on the shape of longitudinal profiles and water levels in rivers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RIVER MECHANICS, 1967. Bern. Suiss. Proceedings...**Bern**: International Union of Geodesy and Geophysics, 1967, p. 105-116.

WESCOTT, W.A. Geomorphic thresholds and complex response of fluvial systems - Some implications for sequence stratigraphy. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v.77, n.7, p.1208-1218, 1993.

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E COMPETÊNCIA DE CURSOS FLUVIAIS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

3.1 Introdução

Desde as primeiras teorias geomorfológicas, os rios são considerados elementos importantes na modelagem do relevo, refletindo os padrões climáticos e geológicos, bem como exercendo o papel de agentes ativos do modelado das formas de relevo (LEOPOLD e MADDOCK 1953; HACK, 1960; HOWARD, 1967; PHILLIPS e SCHUMM, 1987; SCHUMM, 1993; WESCOTT, 1993). O ambiente fluvial e sua respectiva área de drenagem são considerados componentes de um sistema aberto, em constante troca de energia e matéria (HACK, 1960; HOWARD, 1965; CHORLEY, 1962; HUGGETT, 1980).

Além disso, os rios atuam como nível de base para os processos que ocorrem nas vertentes. Os processos de erosão e posterior deposição de sedimentos pelos rios alteram o modelado das encostas, e desta maneira, a incisão da rede de drenagem interfere na energia disponível para a dinâmica evolutiva das vertentes. A dinâmica da rede hidrográfica altera limites de bacias hidrográficas e contribui para o processo de recuo de escarpas e interflúvios (HOWARD, 1965; KING, 1953; KING, 1967).

O comportamento dos sistemas fluviais reflete a integração de fatores como clima, vegetação, topografia, geologia, uso do solo e níveis de base locais, que juntos, determinam o regime hidrológico e hidrossedimentológico (KNIGHTON, 1998). Estas associações tendem a gerar ajustamentos na geometria interna do sistema na busca constante por equilíbrio (CHORLEY, 1962).

A busca da compreensão do equilíbrio nos sistemas geomorfológicos vem sendo trabalhada desde Gilbert (1877). Hack (1960) ampliou consideravelmente suas ideias e ofereceu uma nova abordagem para a interpretação da paisagem, introduzindo o conceito de equilíbrio dinâmico para o estudo da evolução das formas de relevo. Hack (1960) define equilíbrio dinâmico como “um estado de equilíbrio entre forças opostas de tal forma que elas operam a taxas iguais e seus efeitos cancelam uns aos outros para produzir um estado de equilíbrio, em

que a energia está continuamente a entrar e deixar o sistema” (p. 86). Desta maneira, as alterações no relevo decorrentes dos reajustes seriam compensadas pelo rearranjo das variáveis e intensidade dos processos, refletindo-se diretamente nas formas de relevo.

O gradiente dos canais fluviais é ajustado à quantidade de água, carga de sedimentos e à resistência do leito, de tal modo que o trabalho seja igualmente distribuído em todo o segmento fluvial (GILBERT, 1877). E como há interdependência entre os elementos do sistema, qualquer alteração que se processa em um dado local do rio é amplificada às demais partes da bacia (HOWARD, 1965).

Os sistemas de processos-respostas que ocorrem nas bacias se integram a visão de equilíbrio dinâmico. Gilbert (1914 *apud* LEOPOLD, 1980) já estabelecia uma mudança de declividade no leito, bem como agradação ou degradação, associado a distribuição da carga de sedimentos. Ao estudar o transporte desta carga, Gilbert (1877) utilizou a relação entre a energia do rio e a granulometria de seus detritos, como base para avaliar a energia gasta para o transporte de sedimentos, e concluiu que a competência de um rio para transportar detritos é diretamente dependente da energia e declividade do canal.

Mais tarde, Hack (1973), ao estudar a bacia do rio Potomak, nos EUA, retoma os princípios apontados por Gilbert e reafirma tal relação quando indica que o declive tem uma relação direta com a competência do rio, correlação esta, que ele transformou em um índice denominado *Stream-Gradient Index*, ou índice de Hack (IH), que permite expressar a energia dos canais e que se baseia no cálculo da relação entre a declividade e a extensão do canal fluvial.

A declividade tende a diminuir rio abaixo em um perfil côncavo, devido a um ajuste hidráulico e sedimentológico (SINHA e PARKER, 1996; KNIGHTON, 1998). Sendo assim, o estudo da energia dos cursos fluviais de uma determinada área auxilia no entendimento do transporte de sedimentos pelo rio e a configuração morfológica dos mesmos, podendo até servir como indicativo de mudanças estruturais.

O objetivo deste artigo é analisar a relação existente entre a energia e a competência dos rios das bacias Pardo e Alto Jequitinhonha, localizadas predominantemente sobre rochas siliciclásticas na SdEM. Também verificar se esta relação é claramente identificável em áreas de clima tropical úmido. Onde o intemperismo químico é muito ativo, respondendo pelo desenvolvimento de espesso manto de alteração, formando materiais de granulometria fina (DELVIGNE, 1965; MILLOT, 1983; GERRARD, 1988; THOMAS, 1994; TURKINGTON *et al.*, 2005).

3.2 Caracterização da área

A Serra do Espinhaço, por localizar-se na borda do Cráton do São Francisco, sofreu grande deformação durante a Orogênese Brasileira (DUSSIN, 1994), gerando a compressão dos depósitos do Supergrupo Espinhaço, o que resultou em falhamentos inversos e dobramentos, causando inversões estratigráficas, além de diversas estruturas associadas (SANTOS, 2011). Segundo Rolim (1992), a diversidade destas estruturas deve-se às heterogeneidades espaciais da deformação. Para o autor, quanto mais a oeste da Serra, mais aparecem feições que caracterizam cavalgamentos e dobras, com rampas e patamares.

A parte Meridional da Serra estende-se por cerca de 300 Km na direção N-S, abaixo do paralelo 17°S até as proximidades de Belo Horizonte. É sustentada por uma sucessão de rochas quartzíticas pertencentes ao Supergrupo Espinhaço, unidade metassedimentar de maior expressão em área, datada do Mesoproterozóico (ALMEIDA ABREU, 1995). Este Supergrupo é dividido em duas unidades principais: os Grupos Guinda e Conselheiro Mata (Tabela 1). O Grupo Guinda agrega uma espessa sequência de sedimentos de origem continental, com metavulcanitos intercalados, relacionados à fase rifte da Bacia Espinhaço (ALMEIDA ABREU, 1995). O Grupo Conselheiro Mata representa uma espessa pilha de sedimentos de origem marinha costeira com alguma contribuição de sedimentos de origem continental (ALMEIDA ABREU, 1995).

A evolução geomorfológica da SdEM, segundo Saadi (1995) foi condicionada pelos fatores estruturais, morfoestruturais, morfotectônicos e paleoclimáticos. De acordo com Augustin (1995), Augustin *et al.* (2011) e Augustin *et al.* (2014), os rios são condicionados por dobramentos de direção N-S/S-N, falhas

transcorrentes de direção E-W e W-E, bem como por intrusões de rochas metabásicas de múltiplas direções. Por sua vez, esses condicionamentos das redes de drenagem às litoestruturas tiveram grande influência na esculturação das formas de relevo, que são majoritariamente, representadas por cristas, escarpas e vales profundos adaptados às direções tectônicas estruturais (SAADI, 1995).

Tabela 1: Estratigrafia da Serra do Espinhaço Meridional

Supergrupo Espinhaço			
Grupo	Formação	Litologia	
SuperGrupo Espinhaço	Conselheiro Mata	Rio Pardo Grande	Pelitos, arenitos, localmente carbonatos.
		Córrego Pereira	Arenitos (puros, micáceo ou feldspático), localmente pelitos
		Córrego da Bandeira	Pelitos, arenitos
		Córrego dos Borges	Arenitos (puros ou micáceos), localmente brecha/ conglomerados quartzíticos
		Santa Rita	Pelitos, subordinadamente arenitos
	Guinda	Galho do Miguel	Arenitos, localmente leitos pelíticos delgados
		Sopa Brumadinho	Quartzitos, conglomerados, quartzitos micáceos e xistos
		São João da Chapada	Arenitos (médios a grosseiros, puros ou micáceos), filitos hematíticos, conglomerado/ brecha basal
		Bandeirinha	Arenitos puros ou micáceos (incluindo red beds), conglomerados (subordinado), localmente brechas e pelitos
	SuperGrupo Rio Paraúna	Grupo Costa Sena	Sericita/muscovita xistos com +/- quartzo, cianita ou turmalina, quartzitos e vulcânicas ácidas ou básicas
		Grupo Pedro Pereira	Talco xistos com +/- clorita e actinolita/tremolita, serpentinitos, cloritas xistos, formações ferríferas bandadas, localmente mica xistos e vulcânica ácidas.
	Complexo Basal	Granito de Gouveia	Granitos, granodioritos, tonalitos
Grupo Congonhas		Gnaisses, migmatitos, localmente diorito	

Adaptado de Almeida Abreu (1995).

Segundo a classificação de Köppen (1948), o tipo climático é o Cw (Tropical de Altitude). A estação chuvosa na região de Diamantina tem início em novembro e termina em março, alcançando uma média pluviométrica de 223,19 mm neste período, enquanto que na estação seca que se estende de junho a agosto, possui média pluviométrica baixa de 8,25 mm durante estes meses. Os meses

de abril e maio, setembro e outubro ocorrem períodos de transição, chuvoso-seco e seco-chuvoso, respectivamente (NEVES *et al.*, 2005).

A vegetação atual da SdEM pertence ao bioma cerrado, um dos mais ameaçados do mundo. Segundo Horák (2009) a SdEM é composta por Capões de Floresta Estacional Semidecidual em meio ao Cerrado, incluindo neste último as formações savânicas (Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre), as formações florestais (Cerradão) e as formações campestres (Campos Limpos Úmidos, Secos e Campos Rupestres).

A área da pesquisa se concentra nos domínios de rochas siliciclásticas, mais precisamente nas porções das bacias Pardo e Alto Jequitinhonha formadas sobre o Supergrupo Espinhaço.

3.3 Procedimentos Metodológicos

Para avaliar a energia dos canais das bacias de drenagem estudadas, foi utilizado o IH, em conjunto com análises granulométricas dos sedimentos de leito e margem dos rios e também o grau de arredondamento desses sedimentos, para verificar a relação entre energia e competência dos canais fluviais.

Utilizou-se bases de dados topográficos de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 metros, obtidos do Projeto TOPODATA (VALERIANO *et al.*, 2009). Foi utilizada a base hidrográfica do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM (2012) e as geológicas do Projeto Espinhaço (COMIG, 1996) e projetos de mapeamentos geológicos CPRM/CPMTC (2011), ambos na escala de 1:100.000.

Na primeira etapa, o IH foi calculado em segmentos de rios hierarquizados, uma vez que, estes são mais eficientes, permitindo maiores interpretações acerca das variações energéticas ao longo de um canal fluvial, como foi apresentado no capítulo 2. A sua espacialização foi de fundamental importância para selecionar os segmentos de rios a serem amostrados.

3.3.1 Índice de Hack (IH)

Ver capítulo 2.

3.3.2 Trabalho de campo e coleta de amostras

Para a escolha dos rios a serem estudados, levou-se em consideração alguns requisitos: os valores do IH local (alto, médio e baixo), as diferentes ordens hierárquicas e a representatividade da área a ser amostrada.

Pensando na representatividade, foram colhidas amostras em rios de diferentes ordens hierárquicas, afim de estabelecer a dinâmica dos rios e seus sedimentos em graus distintos de energia. Para as coletas foi levado em consideração os valores do IH local: onde teriam amostras com valores de alto, médio e baixo IH. Deste modo, foram selecionados dez rios correspondentes à bacia do Alto rio Jequitinhonha e oito rios da bacia do rio Pardo, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

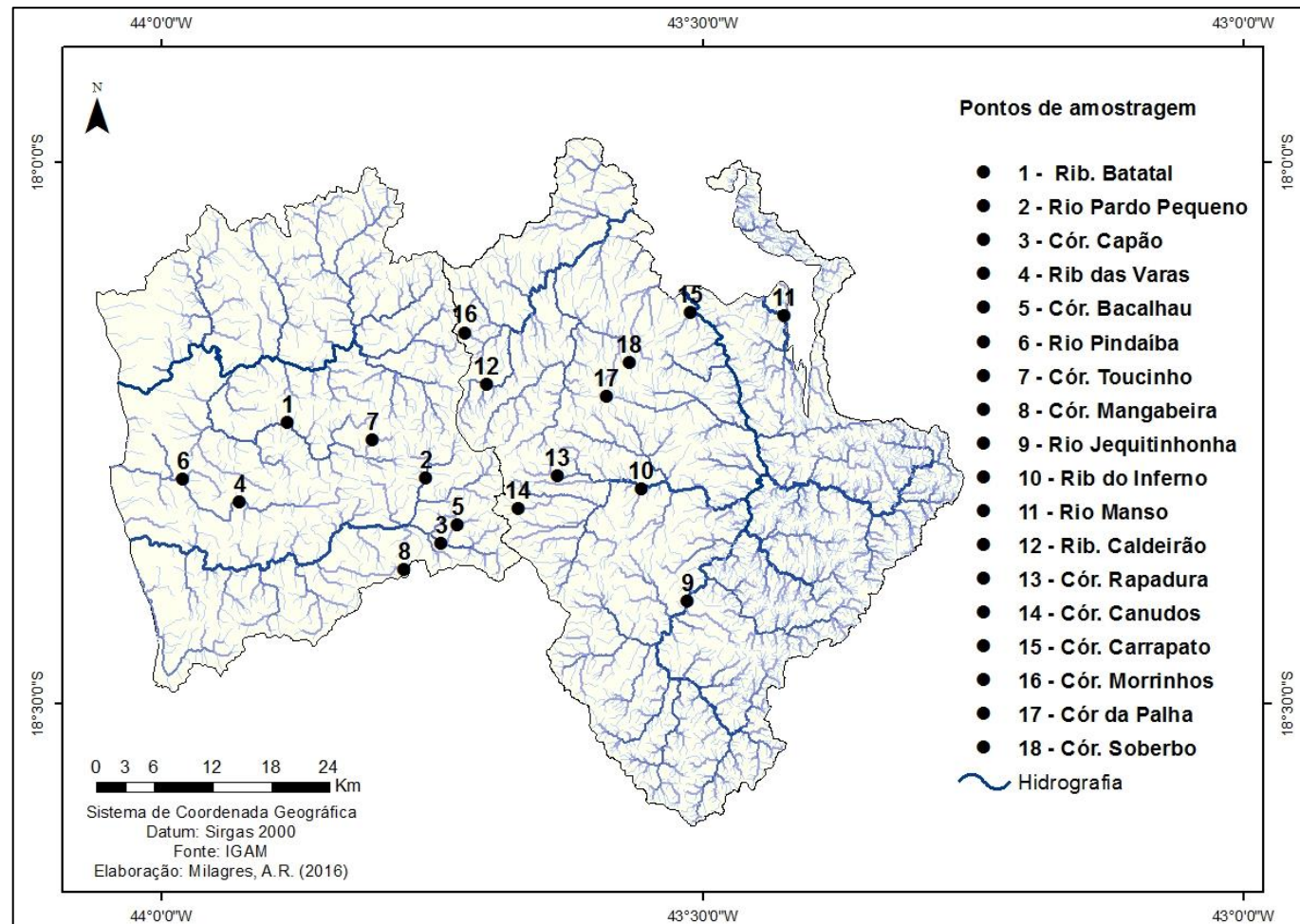
Foram coletados sedimentos em duas profundidades: de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, e em dois pontos de cada um deles: 1) na borda do leito dos rios selecionados e; 2) a 10 metros de distância da mesma.

Essas profundidades foram estabelecidas porque possibilitam, nesse intervalo, a coleta para análises laboratoriais do material de granulometria mais grossa. Isto porque, evidências no campo mostraram que tanto o ponto próximo ao leito, quanto o alocado a 10 m de distância, estão sujeitos a retrabalhamento dos sedimentos pelo rio durante as chuvas mais fortes, ou seja, o material depositado, é continuamente revolvido, o que indica que o uso de intervalos menores de coleta, não é significativo.

A definição das distâncias dos pontos de coleta (beirada do leito e a 10m de distância do leito para a margem esquerda) foi definida porque possibilita a amostragem de sedimentos de diâmetros diferentes condicionados pela dinâmica fluvial.

A escolha da amostragem do lado esquerdo dos rios foi aleatória, mas sistemática, com o intuito de manter um padrão de coleta, que facilitasse a comparação entre o material amostrado. O material foi coletado em período chuvoso, com o auxílio de uma pá, e acondicionado em saco plástico devidamente identificado: nome do rio, local da coleta, coordenadas geográficas, hora e profundidade.

Figura 3.1: Mapa de amostragem da área de estudo



3.3.3 Análises laboratoriais

A granulometria foi realizada no Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

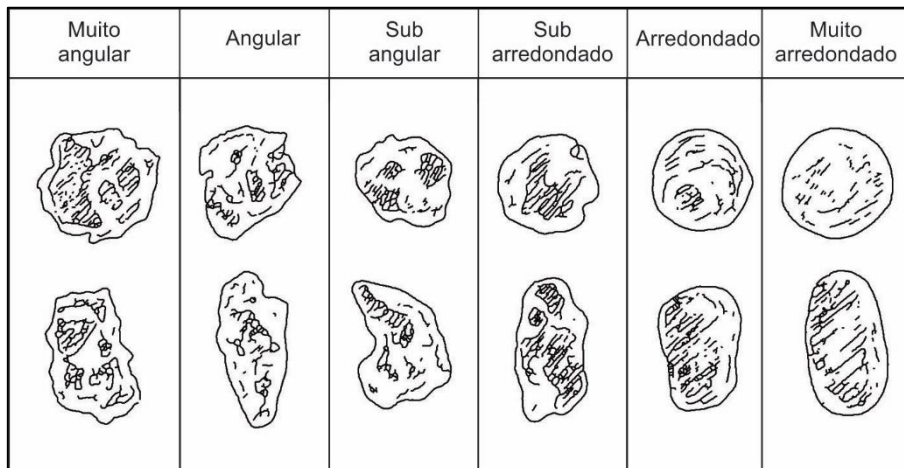
Obteve-se a granulometria dos sedimentos a partir da metodologia proposta pela Embrapa (1997). As amostras foram secas e passadas em peneira de malha de diâmetro de 2,00 mm, para se obter a terra fina seca ao ar (TFSA). Foram pesadas 20 gramas por amostra, sendo dispersas quimicamente com 10mL de NaOH 1 mol L⁻¹ e colocadas no agitador do tipo Wagner por 16 horas a 50 rpm. A fração areia foi separada através de peneira de malha de diâmetro 0,05 mm, e as frações silte e argila através da sedimentação diferencial, segundo a Lei de Stokes, sendo mensurada através do método da pipeta. Depois de separada, a areia passou ainda por mais duas peneiras a fim de se obter areia fina (< 0,053 mm), e areia grossa (>0,2 mm) de acordo com as frações granulométricas definidas pelo sistema de Classificação Norte Americano (USDA). Os sedimentos de granulometria maior que areia foram também submetidos ao peneiramento, sendo que o cascalho em peneira com malha de diâmetro de 2 mm, e o calhau de 2 cm.

Os resultados da granulometria foram expostos em uma tabela, para melhor interpretação e análise dos dados, o que possibilitou identificar a variação da granulometria do material, dependendo do local (leito e margem) e profundidade de coleta.

Foram realizadas análises do grau de arredondamento dos cascalhos, com a utilização de uma lupa (Olympus SZ40 de aumento de 12.5 vezes). Para isso, foram selecionados 100 grãos de sedimentos de cada amostra, para estabelecer um padrão para todas as análises; as amostras que possuíam menos que 100 grãos, não foram analisadas, em virtude da impossibilidade de comparação. Devido a limitada quantidade de calhais, não houve análise do grau de arredondamento nestas amostras.

A análise dos cascalhos seguiu a metodologia de Briggs (1977), onde os 100 grãos foram comparados com uma imagem de *Powers' roundness index* (Figura 3.2).

Figura 3.2 Índice do poder de arredondamento (Powers' roundness index)



Adaptado de Briggs (1977).

3.4 Resultados

Na Tabela 2 são apresentadas algumas informações relacionadas aos segmentos de rios amostrados, no qual é possível notar que não existe nenhum padrão que conecte os dados de IH, hierarquia e litologia, ou seja, não há nenhum indício que a energia do rio seja diretamente dependente de determinada litologia ou ordem hierárquica, sendo necessária a análise em conjunto de outros dados.

Também é muito importante a análise das características de cada segmento de rio em campo, pois cada um possui características e interações distintas que interferem diretamente na disposição energética de seus segmentos. Trabalhos que conseguem relacionar dados de campo com dados de SIG podem se tornar bem completos, uma vez que, os dados de SIG podem ser trabalhados em escalas de menos detalhes que permitem caracterizar grandes áreas e analisar o comportamento de uma bacia. Nos trabalhos de campo foram realizados diagnósticos em escalas bem maiores de detalhe, o que tornou possível entender o comportamento do rio e seus sedimentos naquela área. Deste modo, esta junção de ferramentas quando analisadas em conjunto podem ser muito úteis para o entendimento da dinâmica do relevo.

Tabela 2 Informações referentes aos segmentos de rios amostrados

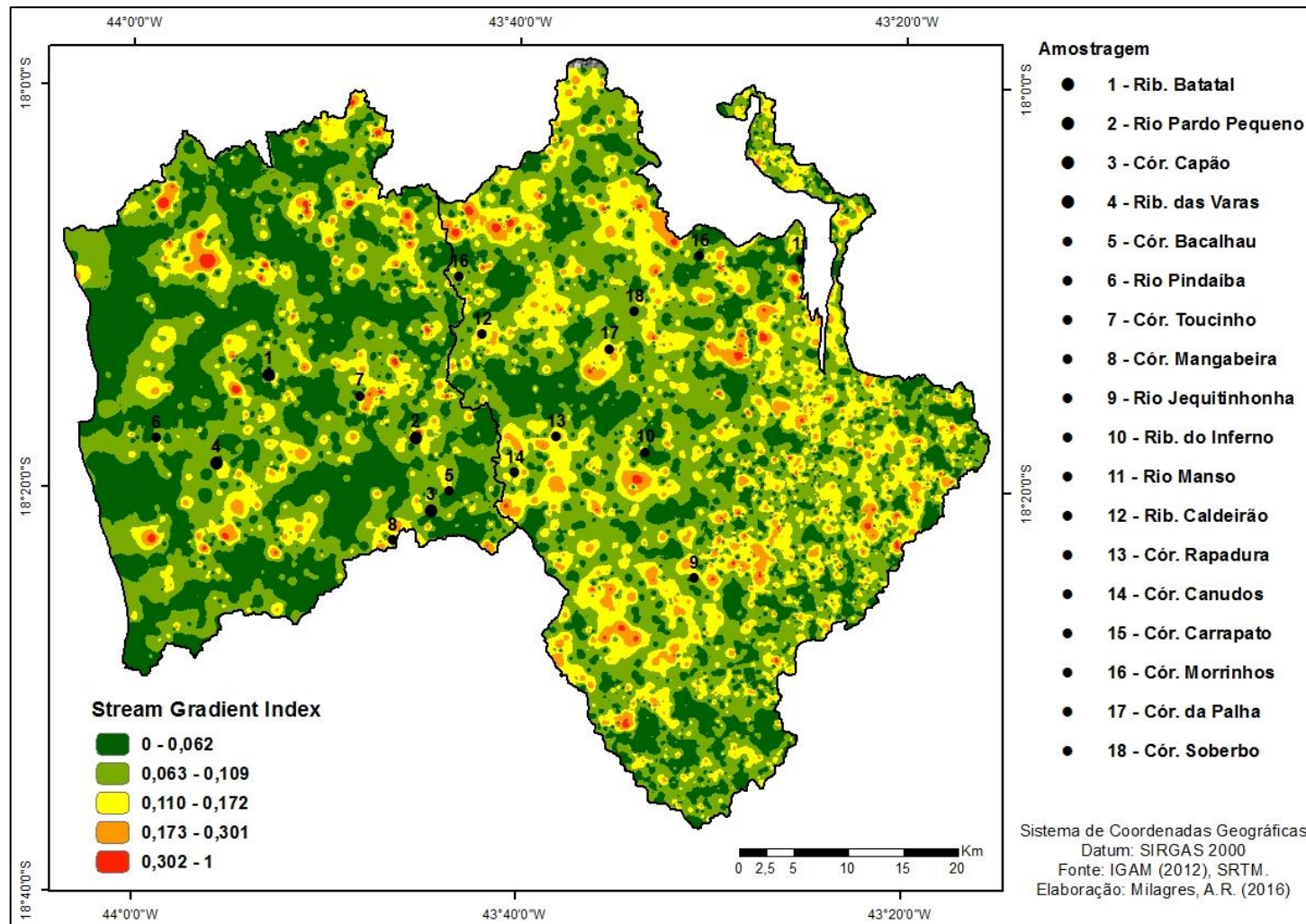
Ponto Amostrado	Nome do rio	Ordem Hierárquica	IH Local	Litologia
Bacia Pardo				
1	Batatal	4	0,91 (Alto)	Santa Rita
2	Pardo Pequeno	4	0,03 (Baixo)	Galho do Miguel
3	Capão	4	0,19 (Baixo)	Galho do Miguel
4	Varas	3	0,46 (Médio)	Córrego Pereira
5	Bacalhau	2	0 (Baixo)	Sopa Brumadinho
6	Pindaíba	2	0,36 (Médio)	Córrego Pereira
7	Toucinho	2	0,64 (Médio)	Galho do Miguel
8	Mangabeira	1	1 (Alto)	São João da Chapada
Bacia Jequitinhonha				
9	Jequitinhonha	5	0,48 (Médio)	Sopa Brumadinho
10	Inferno	5	0,16 (Baixo)	Sopa Brumadinho
11	Manso	5	0,03 (Baixo)	Sopa Brumadinho
12	Caldeirão	4	0,74 (Alto)	Sopa Brumadinho
13	Rapadura	3	0,85 (Alto)	Costa Sena
14	Canudos	2	0,72 (Alto)	São João da Chapada
15	Carrapato	2	0,02 (Baixo)	Sopa Brumadinho
16	Morrinhos	2	0,49 (Médio)	Galho do Miguel
17	Palha	1	0,78 (Alto)	Sopa Brumadinho
18	Soberbo	1	0,1 (Baixo)	Sopa Brumadinho

*Os resultados de IH foram normalizados de 0 a 1. Foram estabelecidos os valores de 0 a 0,33– IH baixo; 0,34 a 0,66 – IH médio; 0,67 a 1 – IH alto.

3.4.1 Índice de Hack

É possível observar pela Figura 3.3, que as respostas ajustadas às variações locais da energia dos canais constitui um método eficiente para demonstrar a relação da energia fluvial e a competência dos rios, pois propicia a compreensão das variações de energia ao longo de todo o curso fluvial, o que é essencial para a análise do comportamento dos sedimentos ao longo do rio. Também pode-se perceber a ocorrência de maior intensidade de valores de IH altos na bacia do Alto Jequitinhonha, o que indica maior potencial erosivo e de dissecação desta bacia, quando comparada a do rio Pardo. Por isso, o relevo da bacia Pardo é constituído por extensas áreas aplainadas com mantos de intemperismo de espessuras variando de centímetros a metros (ROCHA, 2011), principalmente devido à pouca energia para carrear os sedimentos que ficam depositados na bacia. Por outro lado, o relevo da bacia do Alto Jequitinhonha é muito dissecado, com presença de poucas superfícies aplainadas e mantos de intemperismo pouco profundos (ROCHA, 2011). Isso ocorre devido à alta energia dessa bacia para escavar e carrear seus sedimentos, se comportando mais como área de produção e transporte de detritos do que de depósito, como é o caso da bacia Pardo.

Figura 3.3: Mapa do índice de Hack por segmento hierarquizado.



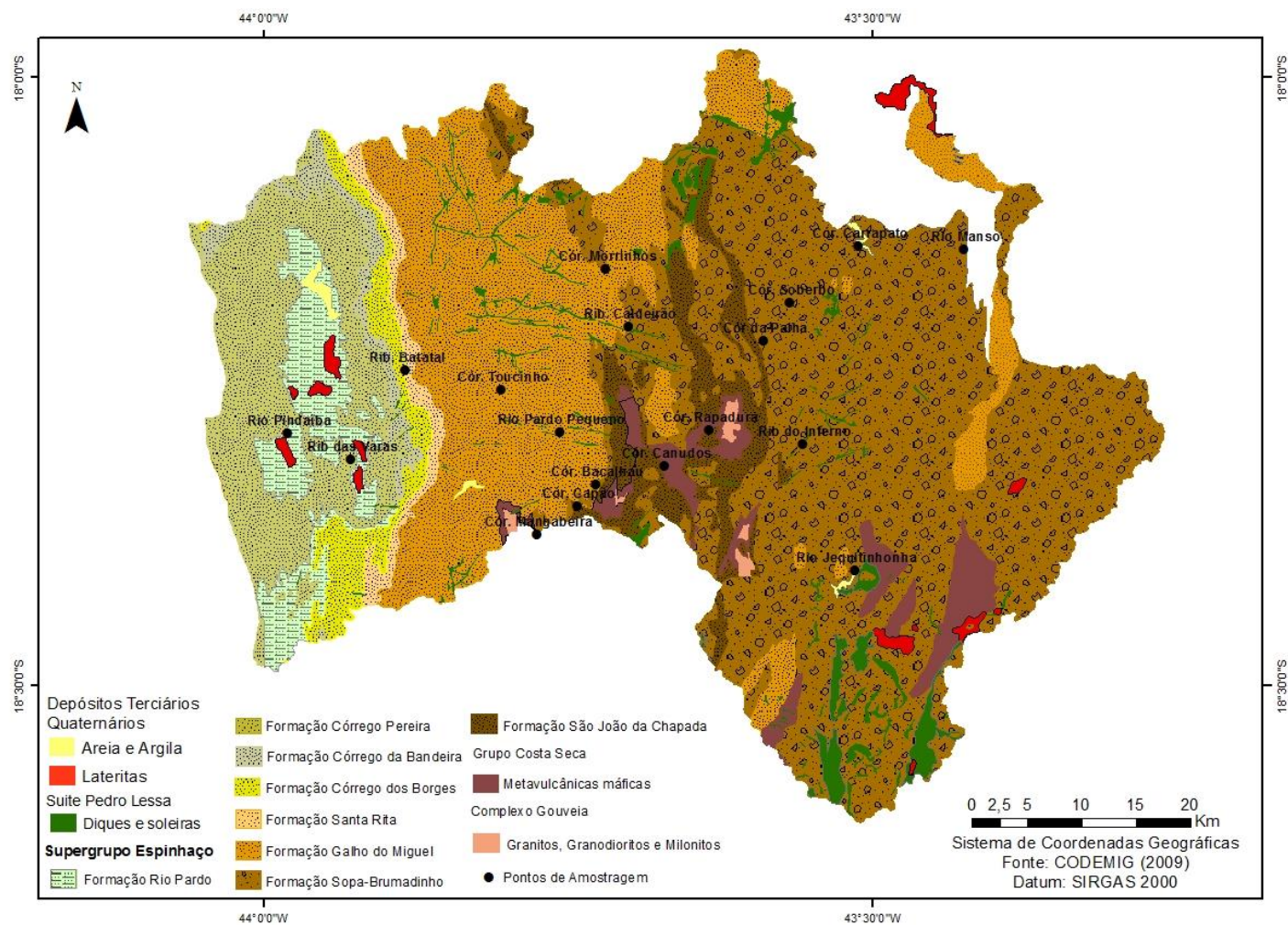
3.4.2 Granulometria

O conhecimento da litologia é de extrema importância para estudos de materiais, principalmente no diagnóstico de suas origens. Qualquer sedimento encontrado no rio tende a ser proveniente de uma rocha localizada a montante do mesmo (BRIGGS, 1977). É importante sinalizar que apesar da área pesquisada estar sobre o domínio de rochas siliciclásticas, que fazem parte do Supergrupo Espinhaço, existem variações na composição destas rochas que se alternam espacialmente conforme a deposição de cada Formação (Figura 3.4), além dos efeitos das compressões do evento Brasileiro que rearranjou a disposição espacial das mesmas (KNAUER, 2007).

A bacia do rio Pardo é bem segmentada em diferentes Formações, embora a maior parte esteja sobre a Formação Galho do Miguel, onde concentra-se a zona de cabeceira, e a Formação Córrego Pereira (Figura 3.4), ambas compostas por arenitos e localmente pelitos (ALMEIDA-ABREU, 1995). Já a bacia do Alto Jequitinhonha se desenvolveu predominantemente sobre a Formação Sopa-Brumadinho (Figura 3.4) e, portanto, é nela que se localiza a maior parte dos segmentos de rios amostrados. Ela é formada por rochas meta-conglomeráticas, que segundo Chaves e Svisero (1993) possui uma matriz de variação pelítica até arenosa média, sustentada por grãos, com clastos de quartzo, filito, filito hematítico, itabirito e rochas metavulcânicas ácidas. De acordo com Silva *et al.* (2015), o tamanho destes clastos pode variar de alguns milímetros até mais de um metro.

O efeito do clima sobre estes conglomerados ao longo do tempo, tem provocado o intemperismo da matriz, expondo os clastos, que voltam a ser distribuídos e muitas vezes transportados pelos rios. Há, portanto, um retrabalhamento de sedimentos fluviais mesoproterozóicos, que podem ser interpretados por aqueles que não conheçam aspectos evolutivos dessa Formação como sedimentos recentes. Deste modo, alguns rios que estão sobre essa Formação podem ter sua energia mascarada através destes sedimentos retrabalhados graças a ação do tempo aliado ao clima.

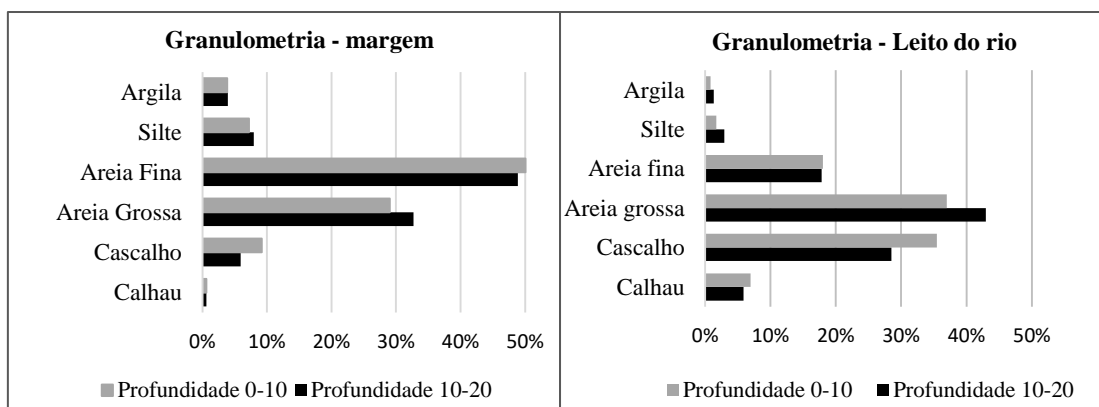
Figura 3.4: Mapa da litologia da área de estudo



As rochas siliciclásticas são muito resistentes ao intemperismo e possuem grande quantidade de quartzo em sua composição (GERRARD, 1988). Mineral este, que compõe a maior parte dos sedimentos transportados pelos rios de ambas as porções das bacias, e por sua alta resistência impossibilita a produção de material muito fino (silte e argila) em quantidade expressiva, mesmo se tratando de uma área de clima tropical úmido. Sendo assim, não é surpresa observar que a porcentagem de silte e argila em todos os rios e em suas margens seja muito baixa, menos de 10% em média (Gráfico 1).

A granulometria realizada para amostras de margem evidenciou uma porcentagem maior de materiais finos e médios, com destaque para a areia fina (em torno de 50%), que se mantém praticamente constantes entre 0 e 20 cm de profundidade (Gráfico 1), provando existir uma baixa variabilidade granulométrica por profundidade. A granulometria de leito possui uma porcentagem maior de sedimentos médios a grossos, destacando a areia grossa e o cascalho, os quais possuem uma pequena variação em profundidade, enquanto o cascalho diminui a areia grossa aumenta quase na mesma proporção (Gráfico 1).

Gráfico 1: Granulometria dada em porcentagem



A presença de muito quartzo na área das bacias, é um fator determinante para a produção de mais areia que silte e argila. Estes sedimentos são materiais capazes de serem transportados até mesmo por rios de baixa energia, por isso são encontrados em todos os níveis dos rios, desde a montante até a jusante.

Deste modo, a SdEM constitui uma interessante área para testar a utilização do IH como base para analisar a relação entre energia e competência, pois apesar de estar em clima tropical úmido, as rochas e os sedimentos desta área são resistentes, favorecendo o entendimento de materiais grosseiros (cascalho e calhau) para alta energia e materiais finos (TFSA) para média e baixa energia.

A baixa variabilidade da granulometria do material coletado nas margens, independente da profundidade, pode ser interpretada como resultante dos processos de erosão próximos a margem, como também da influência mais imediata do rio, e da intensa ação antrópica observada no campo, como a presença de estradas e casas próximas da área de coleta, indicando que as margens podem não ser um bom indicativo para a análise da competência do rio e afirmando que nesta pesquisa os resultados da análise das margens não evidenciam a realidade local de cada rio e sim as interferências realizadas principalmente por homens e animais. Atentando-se para isso, houve a preocupação de focar nos estudos do grau de arredondamento, energia e competência apenas dos sedimentos do leito, afim de não gerar interpretações equivocadas a respeito do comportamento dos rios devido a análises errôneas dos sedimentos de margem, já muito movimentados em razão da intensa interferência externa que ocorre nestas áreas.

3.4.3 Análise do grau de arredondamento dos grãos de cascalho do leito

Segundo WICANDER e MONROE (2009), as partículas mais angulosas apresentam baixo grau de transporte e são produzidas por processos de quebra e lascamento dos sedimentos, enquanto as que se aproximam da forma arredondada, mostra nítido processo de transporte fluvial, por rolamento ou saltitação, responsáveis pelo desarestamento. Desta maneira, o efeito do processo de intemperismo aumenta com a distância de transporte e, como resultado, o sedimento dos rios tendem a ser mais arredondados na direção jusante. Em curtas distancias de um rio com fluxo turbulento (alta energia) o resultado pode ser um maior arredondamento do grão que em áreas de muitos quilômetros de distância de transporte passivo (baixa energia) (BRIGGS, 1977).

Desta maneira, analisar a hierarquia do rio para interpretar o grau de arredondamento dos sedimentos pode não ser muito eficiente, devendo-se levar

também em consideração a energia do canal de maneira a fornecer interpretações mais precisas sobre a competência dos rios.

Os resultados apresentados na Figura 3.3 evidenciaram o maior potencial energético da bacia Alto Jequitinhonha. Ao correlacionar este resultado com o mostrado no Quadro 1, torna-se mais evidente a maior energia confirmada através da variação no grau de arredondamento, com predomínio de material angular a sub-angular na bacia Pardo e sub-angular a sub-arredondado na bacia Alto Jequitinhonha, o que corrobora com os resultados do IH, confirmando uma maior energia para arredondar os sedimentos da bacia do Alto Jequitinhonha.

Os segmentos de hierarquias baixas (1 e 2 principalmente) dos rios amostrados correspondem a áreas de cabeceira que são menos intemperizadas, e que pela menor distância de transporte, costumam produzir sedimentos mais angulosos (BRIGGS, 1977). Os segmentos dos córregos Mangabeiras, Toucinho e Pindaíba (bacia Pardo) possuem sedimentos que variam de muito angulosos a sub-angulosos (Quadro 1), mesmo se tratando de resultados de IH médio e alto (Tabela 2), confirmando este pressuposto. A litologia também auxilia nesta confirmação, uma vez que, estes segmentos estão sobre as Formações São João da Chapada, Galho do Miguel e Córrego Pereira respectivamente, todas compostas por arenito (Tabela 1), ou seja, muito resistentes ao intemperismo.

Os segmentos dos córregos Morrinhos, Palha e Canudos (bacia Alto Jequitinhonha) possuem uma variação do material de sub-angulosos a sub-arredondados (Quadro 1), e apresentam valores de médio e alto IH (Tabela 2), o que poderia confirmar este grau de arredondamento ligado aos fluxos turbulentos das áreas de alta energia e principalmente devido a suas litologias. Os segmentos dos córregos Morrinhos e Palha se localizam sobre a Formação Sopa-Brumadinho, a qual tem seus clastos sendo distribuídos, transportados e retrabalhados pelos rios, mascarando um falso grau de arredondamento. O ponto de coleta de sedimentos do córrego Canudos se deu sobre o contato da Formação São João da Chapada e um afloramento de rochas máficas que produz muitos sedimentos menos resistentes ao intemperismo que são levados até o rio por processos de erosão acelerada, o que explica o maior grau de arredondamento de seus sedimentos.

Quadro 1: Grau de arredondamento de cascalhos em rios da bacia Pardo e alto Jequitinhonha

Amostras por profundidade	Grau de arredondamento	Figura	Amostras por profundidade	Grau de arredondamento	Figura
Bacia Pardo			Bacia Jequitinhonha		
Ribeirão Batatal (0-10cm)	sub-arredondado		Rio Jequitinhonha (0-10cm)	Sub-arredondado	
Ribeirão Batatal (10-20cm)	sub-arredondado		Rio Jequitinhonha (10-20cm)	Sub-angular a sub-arredondado	
Rio Pardo Pequeno (0-10cm)	Sub-angular		Ribeirão do Inferno (0-10cm)	Arredondado a muito arredondado	
Rio Pardo Pequeno (10-20cm)	Sub-angular		Ribeirão do Inferno (10-20cm)	Arredondado a muito arredondado	
Córrego Capão (0-10cm)	Angular		Ribeirão Caldeirão (0-10cm)	Sub angular	
Ribeirão das Varas (10-20cm)	Sub-angular a sub-arredondado		Ribeirão Caldeirão (10-20cm)	Angular a sub-angular	
Córrego Pindaíba (0-10cm)	Sub-angular		Córrego Rapadura (0-10cm)	Sub-angular	
Córrego Pindaíba (10-20 cm)	Sub-angular		Córrego Rapadura (10-20cm)	Sub-angular	
Córrego Toucinho (0-10cm)	Sub-angular		Córrego Canudos (0-10cm)	sub-arredondado	
Córrego Toucinho (10-20cm)	Sub-angular		Córrego Morrinhos 0-10cm	Sub-angular	
Córrego Mangabeira 0-10cm	Angular		Córrego Palha (0-10cm)	Sub-angular a sub-arredondado	
Córrego Mangabeira 10-20cm	Muito angular a angular		Córrego Palha 10-20cm	Sub-angular	

Os segmentos de rios amostrados de hierarquia 3 possuem uma aparente inversão de energia nas duas bacias. No ribeirão das Varas (bacia Pardo) o material varia de sub-angular a sub-arredondado, enquanto o córrego Rapadura (bacia Alto Jequitinhonha) possui sedimentos sub-angulosos (Quadro 1). O ribeirão das Varas deveria ter maior energia do que o córrego Rapadura, uma vez que possui grãos um pouco mais arredondados (BRIGGS, 1977). Entretanto

o ribeirão das Varas apresenta valores de IH menores que o córrego Rapadura (Tabela 2), indicando uma relação não muito clara entre causa e efeito.

O segmento do ribeirão das Varas possui afluentes de alta energia que podem, aparentemente, estar influenciando no transporte de sedimentos mais arredondados. O segmento amostrado do córrego Rapadura está a montante de uma ruptura de declive, o que tende a mascarar a energia de todo o segmento. Isso é comprovado pelo baixo grau de arredondamento dos grãos, que indicam uma baixa energia no local de coleta.

O segmento do ribeirão Caldeirão de hierarquia 4, pertencente a bacia do Alto Jequitinhonha, possui a mesma relação inversa entre IH e grau de arredondamento, semelhante à verificada no córrego Rapadura, ou seja, resultante da ruptura poucos metros a jusante. Desta maneira, é importante alertar para o cuidado com as interpretações de segmentos de rios localizados a montante de rupturas, as quais, podem mascarar a energia total do rio e influenciar os resultados.

Os segmentos de rios de hierarquia 4 da bacia do Pardo, são: rio Pardo Pequeno, córregos Capão e Batatal. Confirmando a baixa energia do rio Pardo Pequeno e córrego Capão (Tabela 2), os sedimentos são de angular a sub-angular (Quadro 1). De acordo com BRIGGS, (1977), outro fator que pode influenciar no grau de arredondamento é o tipo de rocha. Neste caso, os afluentes do rio Pardo encontram-se todos sobre as rochas da Formação Galho do Miguel, altamente resistente, pela sua composição de 95% de quartzo (FOGAÇA, 1997), o que dificulta o grau de arredondamento destes sedimentos. O ribeirão Batatal possui sedimentos sub-arredondados (Quadro 1), confirmando sua maior energia (Tabela 2).

Os segmentos do rio Jequitinhonha e ribeirão do Inferno de hierarquia 5, possuem um grau de arredondamento de sub-angular a sub-arredondado e de arredondado a muito arredondado, respectivamente (Quadro 1). O rio Jequitinhonha possui energia média (Tabela 2), o que poderia confirmar este grau de arredondamento. O ribeirão do Inferno possui baixa energia (Tabela 2) para o alto grau de arredondamento de seus sedimentos, tendo sua explicação ligada à sua litologia, uma vez que, este rio corre sobre a Formação Sopa-

Brumadinho, que pode estar influenciando seus sedimentos, através de seus seixos retrabalhados. Este fato chama a atenção para análises holísticas em trabalhos de campo, partindo de análises regionais para locais, uma vez que, apenas a coleta de amostras, sem a devida observação do ambiente pode não possibilitar as corretas interpretações dos resultados.

Os segmentos dos rios Bacalhau e Manso, e os córregos Soberbo e Carrapato em virtude da grande porcentagem de materiais finos, não alcançaram a quantidade suficiente de 100 grãos em nenhuma de suas amostras (0-10cm e 10-20cm), o que inviabilizou a análise. O ribeirão das Varas não alcançou a quantidade suficiente de amostra até a profundidade de 10 cm, em função da grande porcentagem de TFSA. Nos segmentos dos córregos Capão, Soberbo e Carrapato não houve coleta na profundidade 10-20cm, deste modo apresenta resultados do grau de arredondamento apenas da amostra de 0-10cm de profundidade. Com essas exceções apresentadas, as duas bacias contaram com o mesmo número de amostras analisadas, como pode ser observado no Quadro 1.

3.4.4 Análise da relação energia x competência dos sedimentos de leito

3.4.4.1. Bacia Pardo

A bacia Pardo apesar de possuir um relevo mais aplainado, com extensas áreas de deposição, dispõe de uma rede de drenagem com padrões variados. No Quadro 2 é possível percebermos os diferentes padrões de rios conforme sua ordem hierárquica e respectiva energia. As fotos correspondentes a cada rio do Quadro 2 apresentam algumas peculiaridades a respeito do comportamento do rio frente a sua energia, onde é possível observar que os segmentos de rios de alto IH correm sobre leito rochoso e possuem um sinal de declividade. Já os rios de média e baixa energia não apresentam sinais de declividade evidentes e nem correntezas.

Quadro 2: Informações a respeito dos pontos de amostragem da bacia Pardo, onde pode ser observado as variedades de padrões de rio

Nome do rio	Coordenada (UTM)	Ordem Hierárquica	IH local	Figura
Rib. Batatal	618024/7982817	4	Alto	
Rio Pardo Pequeno	631476/7977108	4	Baixo	
Cór. Capão	632894/7970357	4	Baixo	
Rib. Das Varas	613307/7974728	3	Médio	
Cór. Bacalhau	634562/7972276	2	Baixo	
Cór. Pindaíba	607815/7977168	2	Médio	
Cór. Toucinho	626373/7980979	2	Médio	
Cór. Mangabeira	629359/7967772	1	Alto	

Os segmentos de rios amostrados com baixo IH, são: os córregos Bacalhau, Capão e Pindaíba e o rio Pardo Pequeno (Quadro 3). O segmento do córrego Bacalhau é composto principalmente por sedimentos de granulometria média (areia fina), o que está em discordância com o baixo valor de IH (Quadro 3), não estabelecendo relação direta entre energia e competência, no qual o rio só possui energia para transportar sedimentos de granulometria baixa.

Quadro 3: Informações relativas aos rios amostrados na bacia Pardo e seus respectivos sedimentos de leito.

Amostra	Hierarquia	IH	Profundidade (cm)	Granulometria (%)					
				Argila	Silte	Areia Fina	Areia Grossa	Cascalho	Calhau
Rib. Batatal	4	0,91	0-10	0	0	1	6	88	5
			10-20	0	0	1	8	69	22
Rio Pardo Pequeno	4	0,03	0-10	0	0	2	24	55	19
			10-20	1	1	4	62	27	5
Cór. Capão	4	0,19	0-0,8	2	1	2	60	35	0
Rib. das Varas	3	0,46	0-10	4	7	24	47	9	9
			10-20	9	19	20	30	22	0
Cór. Bacalhau	2	0	0-10	1	6	72	20	1	0
			10-20	2	8	74	16	0	0
Cór. Pindaíba	2	0,30	0-10	0	0	17	43	39	1
			10-20	1	1	9	26	40	23
Cór. Toucinho	2	0,64	0-10	0	0	10	34	47	9
			10-20	0	2	2	45	40	11
Cór. Mangabeira	1	1	0-10	0	0	5	44	45	6
			10-20	0	1	4	53	40	2

O córrego Capão possui seu leito rochoso composto de uma fina camada de sedimentos de granulometria média (areia grossa), que contrasta com sua baixa energia, e atinge apenas a profundidade de 8 cm (Quadro 3). A não acumulação de sedimentos em profundidade, evidencia que mesmo se tratando de um segmento de hierarquia 4, não se comporta como área de deposição de muitos detritos. O córrego Pindaíba possui uma média granulométrica que varia de areia grossa a cascalho (Quadro 3). Tanto o córrego Capão quanto o Pindaíba não estabelecem relação entre energia e competência. Entretanto, estão posicionados em áreas muito antropizadas, próximos a estradas e vilarejos, tornando-se um ponto de difícil interpretação, em função da incerteza se os sedimentos foram transportados pelo rio ou introduzidos aquela área pela ação humana.

O segmento do rio Pardo Pequeno possui 55% de cascalho na profundidade de 0-10 cm, valor que decresce, na profundidade de 10-20 cm, para 27% (Quadro 3). Este decréscimo é balanceado pelo aumento de areia grossa em profundidade, indicando dois ambientes distintos de fluxo de carga. Eles podem ser decorrentes da sazonalidade, com alternância de períodos secos e úmidos

que afetam o fluxo do rio e sua competência (GILBERT, 1877, HACK, 1973, PRESS, 2006). Como esse segmento possui baixo valor de IH e com isso, baixa energia, ele não deveria possuir essa grande porcentagem de cascalho. Entretanto, ao analisar a Figura 3.3, pode-se observar que logo acima deste segmento do rio os valores de IH se tornam altos indicando uma alta energia a montante. Possivelmente, os sedimentos transportados de montante podem estar sendo depositados no segmento analisado, que possui baixa energia para continuar o transporte.

Os segmentos de rios amostrados que possuem médio IH, são: córrego Toucinho e ribeirão das Varas (Quadro 3). Eles contam com materiais que se concentram próximos a valores de granulometria média (Quadro 3). É possível obter uma correlação entre os valores de energia médios e os valores da granulometria, estabelecendo uma relação direta entre energia e competência nestes segmentos.

Os segmentos de rio com alto IH são: o córrego Mangabeiras e o ribeirão Batatal (Quadro 3). O segmento do ribeirão Batatal possui em seu leito grande proporção de cascalho (88%). O córrego Mangabeiras possui principalmente sedimentos que ficam entre areia grossa e cascalho, entretanto tem de levar em conta ainda que o segmento amostrado é de hierarquia 1, ou seja, o rio ainda possui pouca força para escavar e carrear sedimentos mais grossos. Esses dados comprovam a alta competência destes rios e são coincidentes com sua alta taxa de energia.

No córrego Capão, não houve coleta na profundidade de 10-20 cm, em virtude do seu leito rochoso, e a não acumulação de sedimentos a essa profundidade, evidenciando que não se comporta como área de deposição de muitos detritos.

3.4.4.2 Bacia Alto Jequitinhonha

A bacia do Alto Jequitinhonha, diferente da bacia Pardo, possui um relevo dissecado, com mais transporte que deposição de material em função de sua dinâmica energética mais intensa. As fotos correspondentes a cada rio do Quadro 4 apresentam diferentes padrões de rios, devido aos comportamentos do rio frente a sua energia.

Os segmentos de rios de alto IH dessa bacia possuem declividades relevantes, que com o auxílio do Quadro 4 é possível ser percebida no rio Canudos. No córrego Palha não é possível essa observação através da foto, deste modo, essa constatação foi realizada em campo. No ribeirão Caldeirão e no córrego Rapadura também não se percebe sinais de declividade, em virtude destas fotos terem sido tiradas no ponto amostrado que se localiza a montante de quedas d'água, responsáveis por mascarar uma falsa energia para todo o segmento. Os segmentos de rios de médio e baixo IH são mais difíceis de serem diferenciados, sendo preciso sempre o uso do cálculo do IH para isso.

A bacia do Alto Jequitinhonha por dispor de um relevo mais dissecado conseqüentemente possui também maiores declividades, um fator determinante no potencial energético da rede de drenagem, que é responsável por modelar as formas de relevo, assim como, por sofrer influências deste mesmo relevo no processo de ganho de energia. Desta maneira existe uma influência mútua entre as formas de relevo e o rio, dependentes de variáveis como litologia e clima.

Posto isto, os padrões e comportamentos dos rios podem ter sido modelados em um passado onde as variáveis (clima, energia do rio) poderiam ser diferentes, então apenas analisar o comportamento do rio atualmente pode não ser uma boa ideia, uma vez que, seu padrão revela muito mais de sua evolução que de seus processos atuais.

Quadro 4: Informações a respeito dos pontos de amostragem da bacia Alto Jequitinhonha, onde pode ser observado as variedades de padrões de rio.

Nome do rio	Coordenada (UTM)	Ordem Hierárquica	IH local	Figura
Rio Jequitinhonha	656991/7964278	5	Médio	
Rib. do Inferno	652539/7975819	5	Baixo	
Rio Manso	666726/7993449	5	Baixo	
Rib. Caldeirão	637507/7986630	4	Alto	
Cór. Rapadura	644370/7977231	3	Alto	
Cór. Canudos	640534/7973955	2	Alto	
Cór. Carrapato	657482/7993788	2	Baixo	
Cór. Morrinhos	635508/7991888	2	Médio	
Cór. Palha	649268/7985274	1	Alto	
Cór. Soberbo	651555/7988712	1	Baixo	

Os segmentos de rios com baixo IH são: o rio Manso, o ribeirão do Inferno, e os córregos Soberbo e Carrapato (Quadro 5). O rio Manso e os córregos Soberbo e Carrapato possuem valores de granulometria média (areias finas e grossas), contrastando com os valores baixos de energia (Quadro 5). Entretanto, como já discutido algumas vezes neste trabalho, estes segmentos de rios estão sobre a Formação Sopa-Brumadinho que pode estar introduzindo sedimentos de granulometria média mesmo se tratando de rios de baixa energia, além da influência das rochas siliciclásticas muito resistentes ao intemperismo, formando mais sedimentos grossos do que finos.

Quadro 5: Informações relativas aos rios amostrados na bacia Alto Jequitinhonha e seus respectivos sedimentos de leito.

Amostra	Hierarquia	IH	Profundidade (cm)	Granulometria (%)					
				Argila	Silte	Areia Fina	Areia Grossa	Cascalho	Calhau
Rio Jequitinhonha	5	0,48	0-10	0	0	3	42	55	0
			10-20	0	0	5	60	33	2
Rib. do Inferno	5	0,16	0-10	0	0	1	2	85	12
			10-20	0	0	1	11	68	20
Rio Manso	5	0,03	0-10	1	1	23	74	1	0
			10-20	1	1	7	90	1	0
Rib. Caldeirão	4	0,74	0-10	1	1	12	20	66	0
			10-20	1	0	3	31	65	0
Cór. Rapadura	3	0,85	0-10	3	7	27	52	11	0
			10-20	3	9	25	55	8	0
Cór. Canudos	2	0,72	0-10	0	0	0	7	39	54
Cór. Carrapato	2	0,02	0-10	0	1	26	73	0	0
			10-20	1	0	20	79	0	0
Cór. Morrinhos	2	0,49	0-10	1	0	6	58	29	6
Cór. Palha	1	0,78	0-10	1	1	16	42	34	6
			10-20	1	1	14	57	27	0
Cór. Soberbo	1	0,1	0-10	1	6	79	13	1	0
			10-20	1	1	82	14	2	0

No ribeirão do Inferno a diferença entre granulometria e energia é ainda mais acentuada devido a seus valores granulométricos altos (mais de 85% de sedimentos distribuídos entre cascalho e calhau) (Quadro 5), explicada pela sua litologia (Formação Sopa-Brumadinho) e também por receber sedimentos de rios de alta energia a montante. Em campo, não foram vistos conglomerados no leito deste rio e nem em suas proximidades, o que indica que os segmentos amostrados podem estar recebendo este tipo de sedimentos paleofluviais das

áreas a montante. Dessa maneira, esse segmento, assim como o do rio Pardo Pequeno, pode estar se comportando como área de deposição de materiais de maior granulometria trazidos por afluentes.

Os segmentos de rio com valor médio de IH são o rio Jequitinhonha e o córrego Morrinhos (Quadro 5). O córrego Morrinhos possui valor granulométrico médio, o que estabelece uma relação direta com sua energia média (Quadro 5), indicando a existência da relação energia e competência. O segmento do rio Jequitinhonha possui em sua composição principalmente cascalho em superfície, que decresce para areia grossa em profundidade. Esse comportamento se assemelha ao do segmento do rio Pardo Pequeno, e também pode ser interpretado como resultante da ocorrência de dois ambientes distintos de fluxo de carga. Este segmento possui energia média, contudo ao analisar a Figura 3.3, pode-se observar uma alta energia a montante deste rio, com valores de IH elevados. Dessa maneira, assim como o rio Pardo Pequeno e o ribeirão do Inferno, pode estar se comportando como área de deposição de materiais de granulometria média a alta por falta de competência para transportá-los durante os períodos secos.

Os segmentos de rios com altos valores de IH, são: o ribeirão Caldeirão, e os córregos Rapadura, Canudos e Palha (Quadro 5). Os segmentos do córrego Canudos e do ribeirão Caldeirão possuem valores de granulometria altos, todos maiores que areia (Quadro 5), o que está em concordância com a alta energia e competência para carrear sedimentos grossos. O segmento do córrego da Palha possui uma variação de areia grossa a cascalho em seus sedimentos o que confere alta energia e competência para carrear estes sedimentos, mesmo se tratando de um rio de hierarquia 1 que se encontra em uma área de cabeceira, em geral pouco intemperizadas, não disponibilizando tanto material para o transporte, mesmo que o potencial energético esteja presente.

O segmento do córrego Rapadura possui alta energia em desacordo com os valores granulométricos médios (Quadro 5). Esse fato pode estar relacionado à ocorrência de rochas máficas do Grupo Costa Sena (Tabela 1) que estão sofrendo intenso processo de erosão acelerada próximo as margens do rio. Em decorrência, esse material parece ter sofrido remobilizações devido aos efeitos

das chuvas, que transportaram os materiais finos das grandes ravinas que se concentram logo acima da margem esquerda do rio, desta maneira, este rio não possui disponibilidade de sedimentos grossos, pois seus sedimentos possuem menor resistência ao intemperismo. Outro fator agravante foi a coleta de material ter sido realizada poucos metros a montante de uma ruptura de declive, o que pode ter mascarado o fator energia de todo o segmento do rio. Assim, mesmo apresentando alto IH, o curso de água conta com o percentual elevado de granulometria média. Esse resultado aponta para a necessidade de observação direta e constatação da presença de fatores locais que podem alterar qualquer um dos elementos analisados: índice, ou granulometria.

Nos córregos Canudos e Morrinhos, não houve coleta na profundidade de 10-20 cm, em virtude do seu leito rochoso, e a não acumulação de sedimentos a essa profundidade, evidenciando que não se comportam como área de deposição de muitos detritos.

3.5 Considerações Finais

Os rios que mostraram relação IH/granulometria positivos, foram: os córregos Palha, Toucinho, Morrinhos, Mangabeiras, Canudos e os ribeirões das Varas, Caldeirão e Batatal, o que representa 44,4% da amostra total. Desta forma, os rios da bacia Pardo atingiram um maior grau de relação entre IH e granulometria (50%) do que a bacia do rio Jequitinhonha (40%).

Os métodos de análise dos sedimentos e o IH comprovaram a maior dinâmica energética da bacia do Jequitinhonha e evidenciaram a dificuldade de interpretação de dados da mesma, devido ao intenso retrabalhamento dos seixos da Formação Sopa-Brumadinho.

Todos os segmentos de rios amostrados que se localizaram sobre a Formação Sopa-Brumadinho tiveram sua energia mascarada por sedimentos de granulometria alta. Deste modo, todos os segmentos com IH baixo e médio, localizados sobre essa litologia, não evidenciaram relação direta entre energia e competência. Este fato chama a atenção para a importância da investigação da dinâmica da bacia e não só do segmento de rio estudado. O conhecimento das características fluviais é importante não somente no que concerne aos recursos

hídricos, como também do ponto de vista sedimentológico, geomorfológico e geológico.

Nenhum rio de baixa energia alcançou uma relação positiva entre energia e granulometria, isso se deve principalmente a litologia resistente ao intemperismo das rochas siliciclásticas, que ocasiona na baixa disponibilidade de sedimentos mais finos.

O uso do IH para análises da relação energia/competência na área de estudo evidenciou muitos problemas pautados principalmente em função da resistência litológica, dos processos passados de evolução do relevo e das interferências antrópicas. Portanto, recomenda-se a utilização do IH para análises da relação energia/competência apenas com as devidas constatações em campo e as devidas observações a respeito das peculiaridades de cada rio.

3.6 Referências bibliográficas

ALMEIDA-ABREU P.A. O Supergrupo Espinhaço: O rifte, a bacia e o orógeno. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.3 n.1, p.1-18, 1995.

AUGUSTIN C.H.R.R. 1995a. **Geoökologische Studien im Südlichen Espinhaço Gebirge bei Gouveia, Minas Gerais, Brasilien Unter Besonderer Berücksichtigung der Landschaftsentwicklung**. Universidade de Frankfurt, Frankfurt a.m., Alemanha. Tese de Doutorado, 254 p

AUGUSTIN, C. H. R. R.; FONSECA, B. M.; ROCHA, L. C. Mapeamento Geomorfológico da Serra do Espinhaço Meridional: primeira aproximação. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.19, n.2, p. 50-69, 2011.

BRIGGS, D.J. **Sources and Methods in Geography; Sediments**. Fakenham Press Limited, Fakenham, Norfolk, London, 1977, 189 p.

COMIG. Projeto Espinhaço. Belo Horizonte, Cia. Mineradora de Minas Gerais. (inclui 23 mapas geológicos na escala de 1:100.000), 1996. Disponível em: http://www.comig.com.br/site/content/parcerias/levantamento_aerogeofisico.asp?id=30&idSubPrj=50&filhold=51

CHAVES, M.L.S.C.; SVISERO, D.P. Características geológicas e origem dos conglomerados diamantíferos das regiões de Diamantina (Mesoproterozóico) e de Romaria (Cretáceo Superior), Minas Gerais. **Boletim IG-USP**, Série Científica. v. 24, p.49-57, 1993.

CHORLEY, R. J. Geomorphology and general systems theory. USGS, **Professional paper** 500 B, 1962. (tradução em **Notícia Geomorfológica**, v. 22, n. 23, 1971. p. 3-22)

DELVIGNE, J. **Pédogenese en zone tropicale. La formation dès minéraux secondaires em millieu ferrallitique**. Mém. ORSTROM 13, Dunod, Paris, 1965. 177 p.

DUSSIN, I.A., 1994. **Evolution structurale de la region de l'Espinhaço Meridional, bordure Sud-est du Craton São Francisco Brésil**. Tectoniques superposées au Protérozoïque. Tese de Doutorado, Univ. Orléans, 200p.

FOGAÇA, A.C.C. Geologia da Folha Diamantina. In: GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; SOARES-FILHO, B.S. (coordenadores e editores). **Projeto Espinhaço em CD-ROM (textos, mapas e anexos)**. Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. 1997. 1598p.

GERRARD, A.J. **Rocks and Landforms**. Unwin Hyman Ltd, London, 1988. 319p.

GILBERT, G.K. **Report on the geology of Henry mountains**. U.S. Geog. & Geol. Survey of the Rocky Mountain Region. Department of the Interior. Washington. 1877, 151p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br>>. Acesso em: 10.fev.2015.

KING, L.C., Canons of landscape evolution, **Geological Society of America Bulletin**, v. 64, p. 721-751, 1953.

KING, L. C. **The Morphology of The Earth: A Study and Synthesis of World Scenery**. Edinburgh: Oliver & Boyd Ltd, 1967. 726 p.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. México. Fundo de Cultura Econômica. 1948.

KNAUER, L.G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.15, n.1, p. 81-90, 2007.

KNIGHTON, A.D. **Fluvial forms and processes: a new perspective**. Arnold, London, U.K. 1998.

HACK, J.T. Interpretation of erosional topography in Humid Temperate regions. **American Journal of Science**, v. 258 A, p 80-97, 1960.

HACK, J.T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal of Research of the United States Geological Survey**, v.1, n.4, p.421-429. 1973.

HÓRAK, I. 2009. **Relações pedológicas, isotópicas e palinológicas na reconstrução paleoambiental da turfeira da Área de Proteção Especial (APE) Pau-de-Fruta, Serra do Espinhaço Meridional-MG**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 281p. 2009.

HOWARD, A.D. Geomorphological Systems: equilibrium and dynamics. **American Journal. Science**, v. 263, n. 4, p.302-312, 1965.

HOWARD, A.D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. **American Association of Petroleum Geology Bulletin**, Tulsa, v.51, n.11, p.2246-2259, 1967.

HUGGETT, R. **Systems analysis in Geography**. New York: Oxford University, 1980.

LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. **Geological Survey Professional Paper**. v.252. p.1-57, 1953.

LEOPOLD, L.B. Techniques and interpretation: The sediment studies of G. K. Gilbert. **Geological Society of America**. Special Paper. v.183, p.125-128, 1980.

MILLOT, G. Planation of Continents by Intertropical weathering and pedogenetic processes. In: **Proceedings of the II International Seminar on Laterization Processes**, São Paulo, IGCP-129/IAGC, 1983. p.53-63.

NEVES, S.C.; ALMEIDA-ABREU, P.A. e FRAGA, L.M.S. Fisiografia. In: SILVA, A.C *et al* eds. **Serra do Espinhaço Meridional: Paisagem e ambiente**. Belo Horizonte, O Lutador, 2005. p. 137-147.

PHILLIPS, L.F.; SCHUMM, S.A. Effect of regional slope on drainage networks. **Geology**, v.15, n.9, p.813-816, 1987.

PRESS, F. **Para entender a Terra**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

ROCHA, L.C. **Desnudação geoquímica na evolução da Serra do Espinhaço Meridional - MG - Brasil**. 2011. Dissertação de Mestrado (Geografia) Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2011.

ROLIM V.K. Uma interpretação das estruturas tectônicas do Supergrupo Espinhaço, baseado na geometria dos falhamentos de empurrão. **Revista Escola de Minas**, v.45, p.75-77. 1992.

SAADI, A.A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e suas margens. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.3, n.1, p.41-63, 1995.

SANTOS, M.A **Evolução sedimentológica e paleogeográfica do sistema de riftes do Espinhaço Meridional**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SCHUMM, S.A. River response to base level change: Implications for sequence stratigraphy. **Journal of Geology**, v.101, n.2, p. 279-294, 1993.

SILVA, M.C.R., CHAVES, M.L.S.C., ANDRADE, K.W. Clastos de formação ferrífera bandada no Conglomerado diamantífero Sopa em Extração (Diamantina, MG). São Paulo, UNESP, **Geociências**, v.34, n. 2, p. 153-168, 2015.

SINHA, S.K.; PARKER, G. Causes of concavity in longitudinal profiles of rivers. **Water Resources Research**, v. 32, n.5, p. 1417-1428, 1996.

THOMAS, M.F. **Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates**. Macmillan, London, 1974, p. 329.

THOMAS, M.F. **Geomorphology in the Tropics - a study of weathering and denudation in low latitudes**. New York, John Wiley e Sons, 1994. 460p.

TURKINGTON, A. V.; PHILLIPS, J. D.; CAMPBELL, S. W. Weathering and landscape evolution. **Geomorphology**, v. 67, n.4, p. 1-6, 2005.

VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F.; ALBUQUERQUE, P.C.G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal, RN. **Anais**. São José dos Campos, SP : INPE, 2009. Artigos, p. 1-8. CD-ROM.

WICANDER, R. e MONROE, J.S. 2009. **Fundamentos de Geologia**, São Paulo, Cengage Learning, 145p.

CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

As bacias do Alto Jequitinhonha e Pardo evidenciaram dinâmicas energéticas distintas, no qual, a bacia Alto Jequitinhonha mostrou ter mais energia do que a bacia Pardo, em todas as análises. É possível observar isso, também em campo, onde as formas de relevo indicam o grau de energia, principalmente através da intensa dissecação presente na bacia Alto Jequitinhonha.

Com relação a aplicação do IH, sem dúvidas, ele consiste em um ótimo índice para calcular a energia de canais fluviais, e analisar a dinâmica energética de uma bacia. A escolha pelo melhor método de cálculo desse índice irá depender do objetivo e escala do trabalho. Para este trabalho, onde era necessário compreender a energia dos rios em escala de detalhe, o índice utilizando o comprimento do rio hierarquizado, foi o mais eficiente.

Este índice apresentou problemas na análise da competência dos rios na área estudada. A presença dos conglomerados da Formação Sopa-Brumadinho ao sofrerem intemperismo e seus seixos estarem sendo novamente retrabalhados pelos rios atuais, evidenciou um aumento na granulometria dos sedimentos dos rios, o que levou a um mascaramento da competência destes.

Por isso é de extrema importância a utilização do IH apoiado a trabalhos de campo, pois sem o conhecimento prévio das especificidades de cada área o pesquisador pode obter interpretações equivocadas, ainda mais se tratando de áreas de clima tropical úmido, como é o caso do Brasil, onde a dinâmica fluvial e os processos são muito intensos, dificultando a interpretação dos dados. Visto que, o IH consegue captar as mudanças no relevo atual, mas não é capaz de responder pela história evolutiva de uma área, deste modo, a aplicação desse índice, aliado a trabalhos de campo pode ser uma ferramenta muito interessante para compreender a evolução de um relevo, e o seu grau de equilíbrio.