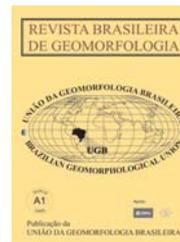




www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 13, nº 2 (2012)



# EROSÃO, DENUDAÇÃO E EVOLUÇÃO DO RELEVO DA MÉDIA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL, MINAS GERAIS

## EROSION, DENUDATION AND RELIEF EVOLUTION OF THE MIDDLE SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL, MINAS GERAIS

**Marina Ribeiro Leão**

Mestre em Geografia e Análise Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte/MG - Avenida Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte, MG - CEP 31270-901 - Tel: (31) 3409-5462 - e-mail: marina.rleao@gmail.com

**Éric Andrade Rezende**

Mestrando em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte/MG - Avenida Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte, MG - Brasil - CEP 31270-901 - Tel: (31) 3409-5462 - e-mail: ear.88@hotmail.com

**André Augusto Rodrigues Salgado**

Professor adjunto do Departamento de Geografia do IGC/UFMG - Avenida Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - CEP 31270-901 - Tel: (31) 3409-5462 - e-mail: geosalgado@yahoo.com.br

**Hermínio Arias Nalini Júnior**

Professor Associado do Departamento de Geologia - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto - Campus Morro do Cruzeiro - Bauxita - Ouro Preto, MG - CEP 35400-000 - e-mail: nalini@degeo.ufop.br

### Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:  
15/12/2010

Data de Aprovação:  
25/05/2012

### Palavras-chave:

Serra do Espinhaço Meridional;  
Evolução do Relevo;  
Desnudação Geoquímica.

### Keywords:

Serra do Espinhaço Meridional;  
Relief Evolution; Chemical  
Denudation.

### Resumo

O presente trabalho investigou a evolução do relevo da média Serra do Espinhaço Meridional (SdEM), região que delimita três das mais importantes bacias hidrográficas do sudeste brasileiro: à oeste, a do rio São Francisco e, à leste, as dos rios Doce e Jequitinhonha. Os procedimentos metodológicos basearam-se na utilização de dois tipos de análises. A primeira baseou-se em observações de campo e em análises cartográficas e visou reconhecer áreas onde os processos erosivos eram mais ativos. A segunda objetivou mensurar a atual denudação geoquímica em 16 bacias hidrográficas que se localizam nas duas vertentes da média SdEM. Os resultados demonstram que a litologia predominante – quartzito – é extremamente resistente aos processos intempéricos e desnudacionais e que o arcabouço litoestrutural controla os processos desnudacionais da área investigada. Demonstram ainda que, embora a vertente leste apresente relevo mais dissecado, fato que indica que no passado nesta vertente os processos desnudacionais eram mais intensos, é na vertente oeste que, atualmente, os processos desnudacionais geoquímicos são mais agressivos.

### Abstract

This paper investigates the relief evolution of the middle Serra do Espinhaço Meridional (SdEM), a region that divides three of the most important river basins in southeastern Brazil: in the west, São Francisco river and in the east, Doce and Jequitinhonha rivers. The methodology

was based on two types of analyzes. The first was field observations and cartographic analysis and aimed at recognizing areas where erosion processes were more active. The second aimed to measure the actual geochemical denudation in 16 river basins that are located in the two slopes of middle SdEM. The results demonstrate that the predominant lithology - quartzite - is extremely resistant front of the weathering and the denudation processes and that the litoestrutural framework is controlling the denudation processes in the area. They also show that, although the eastern slope presents more dissected topography, which indicates that in the past the denudation processes were more intense, is on the western slope that currently chemical denudation are more aggressive.

## Introdução

A Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) constitui um conjunto de terras elevadas – serras e planaltos – que divide três das mais importantes bacias hidrográficas do sudeste brasileiro: à oeste, a do rio São Francisco e, à leste, as dos rios Doce e Jequitinhonha. Além de constituir um importante divisor de águas, esta serra separa ainda domínios tectônico-morfo-bio-climáticos (Valadão, 1998). A bacia do rio São Francisco drena um cráton, possui relevo suave, vegetação savânica e clima tropical semi-úmido. Por sua vez, as bacias dos rios Doce e Jequitinhonha caracterizam-se por drenar áreas com maior atividade tectônica, relevo movimentado, vegetação de floresta semi-decidual (Mata Atlântica de interior) e clima tropical úmido.

Estas condições naturais – clima, estrutura e tectonismo – tendem a promover maior intensidade dos processos de intemperismo e de desnudação na vertente leste – bacias dos rios Doce e Jequitinhonha. Algumas pesquisas que abarcaram análises morfológicas e morfométricas nesta área (Saadi, 1995; Valadão, 1998; Fonseca, 2009) adotam esta proposição. Além disso, Valadão (1998) credita à SdEM um comportamento de grande escarpamento de margem passiva, vinculando-se ao modelo de evolução do relevo proposto por Summerfield (1989, 1991). A aplicação deste modelo, para esta porção do Brasil, sugere que o compartimento atlântico (vertente leste da Serra do Espinhaço), expande-se por apresentar taxas erosivas mais agressivas, ganhando área em detrimento do compartimento interiorano do vale do rio São Francisco (vertente oeste).

Entretanto, foram poucos os trabalhos que mensuraram taxas erosivas e desnudacionais na SdEM. Dentre estes, destacam-se os de Salgado & Valadão (2003; 2005) que mensuraram taxas de desnudação geoquímica na Depressão de Gouveia e no seu entorno. No entanto, estes estudos foram realizados apenas em parte da vertente oeste. Sendo assim, a inexistência de dados na vertente leste da SdEM não permite verificar a intensidade de suas taxas e, conseqüentemente, compará-las às taxas da vertente oeste.

Neste contexto, justifica-se o presente trabalho, que objetiva investigar a evolução do relevo da porção média da SdEM (Figura1) através de observações morfológicas em ambas as vertentes e da mensuração da atual taxa de desnudação geoquímica de algumas sub-bacias.

## Caracterização da Área de Estudo

Neste trabalho, considera-se que a SdEM (Figura 2), ao longo dos seus 300 km de extensão na direção N/S, pode ser dividida em três porções: (i) sul – desde o Quadrilátero Ferrífero até a parte mais setentrional da Serra do Cipó; (ii) média – do norte da Serra do Cipó até o sul do Planalto de Diamantina e; (iii) norte – do sul do Planalto de Diamantina até a região de Olhos d'Água. A porção média apresenta características ambientais – geologia, relevo, clima, solos e vegetação – que não diferem sensivelmente do restante da SdEM. Apesar disso, dentre as três áreas, ela é a que menos foi investigada cientificamente, tendo sido selecionada para estudo no presente trabalho.

A SdEM representa uma faixa paleo-orogênica que limita a bacia do rio São Francisco, localizada sobre o cráton homônimo, com a porção leste do território brasileiro. Possui como conjuntos tectonoestratigráficos maiores, o Complexo Basal e o Supergrupo Espinhaço - essencialmente constituído por rochas quartzíticas e, subordinadamente, rochas filíticas, conglomeráticas e vulcânicas de caráter básico e ácido (Almeida Abreu, 1995). Unidades dos grupos Macaúbas – predominância de quartzitos – e Bambuí – rochas carbonáticas – aparecem contornando essa serra e sobrepondo localmente suas faixas limítrofes (Figura 3). Apesar da grande quantidade de trabalhos realizados na SdEM (compilações em Uhlein, 1991; Renger & Knauer, 1995), a evolução geológica do Supergrupo Espinhaço é ainda controversa (Knauer, 2007). Concorde-se que, durante a fase inicial de rifteamento, a SdEM foi afastada de sua parte setentrional por um sistema de falhas transcorrentes sinistrais de direção nordeste que compõem a Faixa Araçuaí. As faixas de dobramentos que circundam o Cráton do São Francisco promoveram o transporte de matéria no sentido do cráton e, conferiram esforços compressionais sobre ele (Valadão, 1998).

O padrão estrutural denota a intensa deformação das rochas em virtude das atividades termo-tectônicas ocorridas no Evento Brasileiro, apresentando empurrões e dobras com vergência para oeste como as principais estruturas regionais. A escarpa ocidental configura-se como uma feição morfotectônica típica de *front* de cavalgamento e a borda oriental é marcada pelas interferências constantes de falhas que compõem o cinturão de cavalgamento (Saadi, 1995).

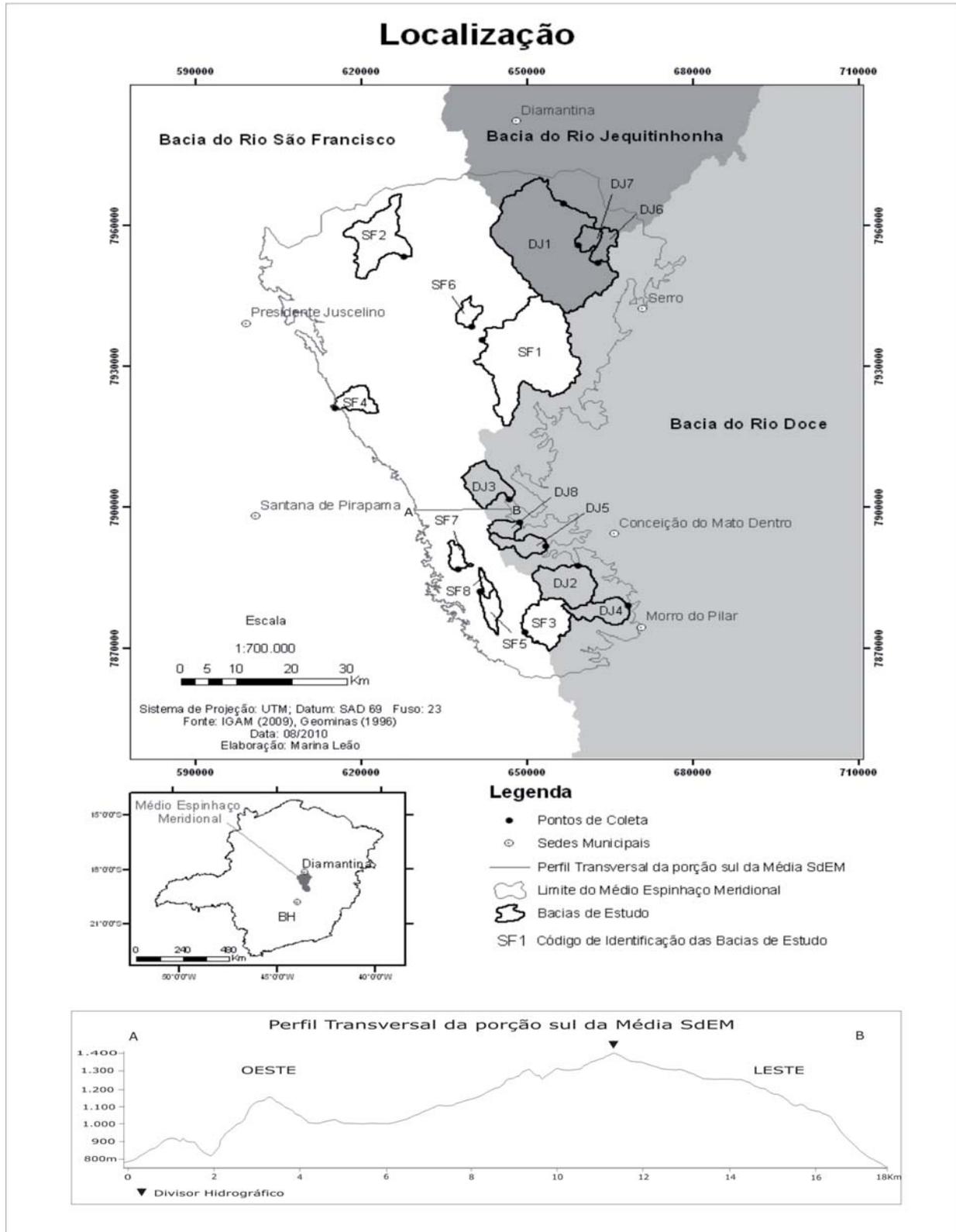


Figura 1 - Localização da Área de Estudo e das Bacias Amostradas

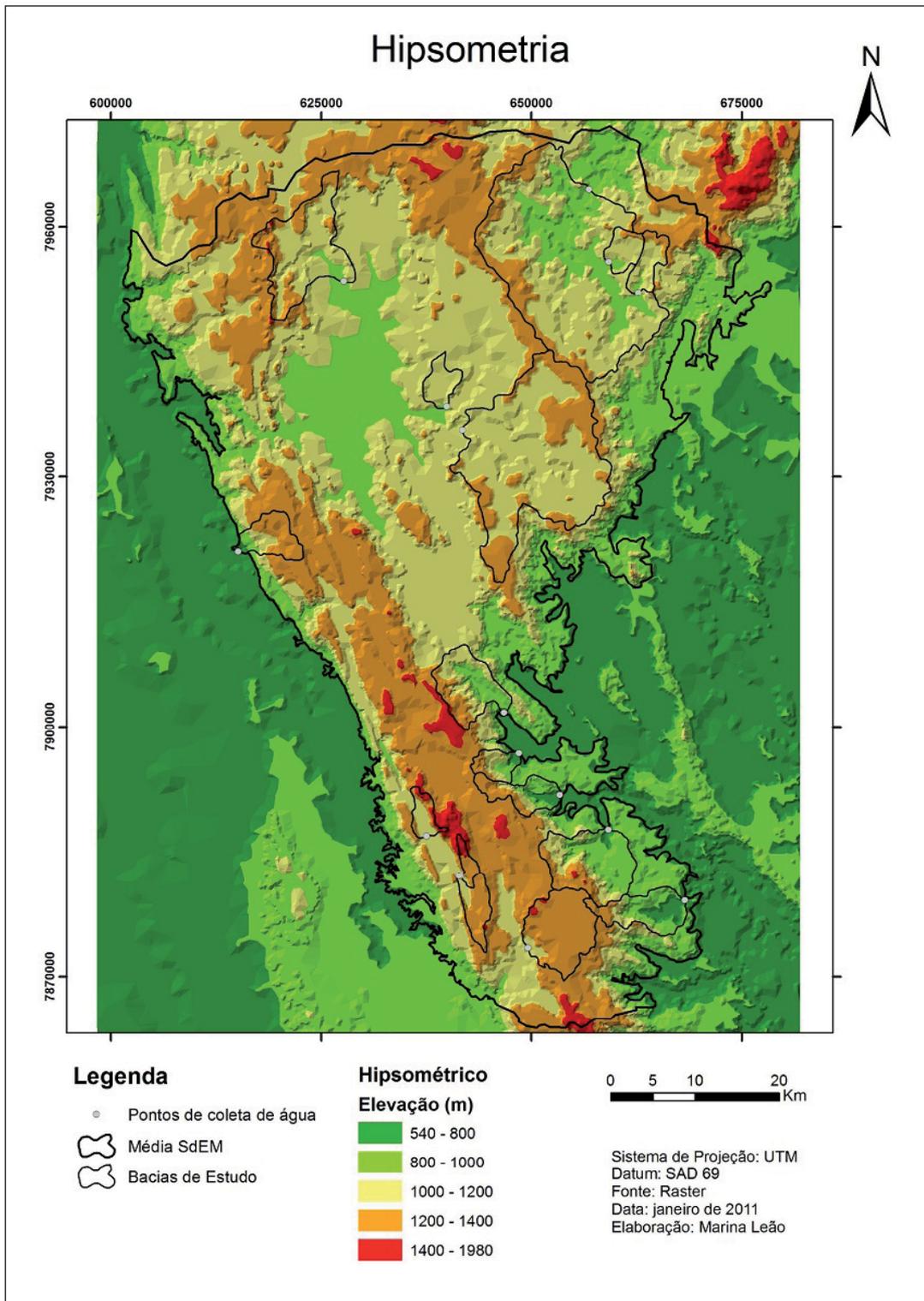


Figura 2 - Modelo Digital de Terreno da Sdem

O modelado é caracterizado pela marcante orientação estrutural de suas feições morfológicas. A prevalência de quartzitos condiciona uma cobertura rígida, intensamente falhada e fraturada, cuja esculturação promovida pela rede de drenagem configura a ocorrência generalizada de escarpamentos, linhas de cumeada e grandes desníveis topográficos, organizados segundo as direções tectônicas e estruturais (Saadi, 1995; Valadão, 1998). Áreas deprimidas, onde afloram rochas granitóides, metassedimentares e metavulcânicas, ocorrem entre Gouveia e Conceição do Mato Dentro. Morfológicamente, configuram-se como colinas policonvexas mais ou menos suavizadas (Saadi, 1995). Na porção média da SdEM, a rede de drenagem apresenta cânions entalhados perpendiculares às escarpas. A borda leste não apresenta a mesma regularidade da escarpa ocidental, tratando-se de um escarpamento descontínuo, comumente composto por dois ou mais degraus e bruscas mudanças de direção (Saadi, 1995). As diversas feições geradas pela rede hidrográfica, que variam segundo a escala de estudo, são fortemente condicionadas pelo controle estrutural e/ou tectônico.

O clima da região é tropical semi-úmido com estações bem demarcadas: apresenta invernos secos e verões úmidos. A respeito do clima regional, é possível definir ainda duas particularidades: (i) as porções topograficamente mais elevadas apresentam temperaturas sensivelmente mais baixas que as bordas da SdEM; (ii) a porção oeste apresenta estação seca muito mais pronunciada do que a leste. Já os solos da região são condicionados pelo substrato geológico. Nas bordas da SdEM e no interior da área moldada sobre o embasamento granítico-gnaissico são comuns os latossolos e cambissolos (Diniz *et al.*, 2005). Nas áreas moldadas sobre os quartzitos, predominam neossolos litólicos. A cobertura vegetal original da área de estudo é condicionada por estas características climáticas e pedo-geológicas. As porções topograficamente menos elevadas apresentam duas regiões fitoecológicas que marcam as vertentes leste e oeste da SdEM, respectivamente a floresta semi-decidual e a savana (cerrado). Por fim, as áreas mais elevadas – geralmente moldadas sobre os quartzitos – apresentam vegetação de campo rupestre e, subsidiariamente, campo limpo.

### **Procedimentos Metodológicos**

Os procedimentos metodológicos basearam-se na utilização de dois tipos de análises: uma subjetiva e outra objetiva. A primeira visou reconhecer áreas onde os processos erosivos eram mais ativos. A segunda objetivou mensurar a atual desnudação geoquímica nas duas vertentes da média SdEM.

Para o reconhecimento das áreas onde os processos erosivos eram mais ativos, em um primeiro momento fo-

ram observadas as variações morfológicas existentes entre as duas vertentes da média SdEM: São Francisco e Doce/Jequitinhonha. Essas observações foram realizadas por meio de trabalhos de campo, análise de mapas topográficos, imagens de satélite e modelo digital de elevação da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), além de pesquisa bibliográfica. Buscou-se na topografia indícios da intensidade dos processos desnudacionais em cada uma das vertentes limitadas pelo divisor hidrográfico regional.

Já na segunda etapa do trabalho visou-se quantificar a intensidade da desnudação geoquímica na média SdEM em suas duas vertentes. Para tanto, foram analisados mapas geológicos e topográficos para selecionar as bacias hidrográficas adequadas ao estudo. Optou-se por trabalhar com 16 sub-bacias hidrográficas representativas do contexto geológico/geomorfológico regional e com mínima interferência antrópica: oito em cada vertente (Figuras 1 e 3).

As litologias predominantes nas bacias estudadas são o quartzito e o xisto-filito quartzítico, entrecortados por intrusões de rochas metabásicas. Entretanto, de um modo geral, na vertente do São Francisco afloram, com maior recorrência, outras litologias – principalmente granitos-gnaisses e rochas carbonáticas. Sendo assim, como o trabalho objetiva amostrar a realidade do escarpamento da média SdEM, as bacias selecionadas que vertem para o oeste possuem maior quantidade de rochas não quartzíticas. Por fim, a escolha de bacias hidrográficas de diferentes tamanhos permite mensurar a desnudação geoquímica em função da área, visto que os processos desnudacionais em bacias hidrográficas tendem a ser mais agressivos próximos às cabeceiras que nas partes baixas dos cursos fluviais (Milliman & Syvitski, 1992; Salgado *et al.*, 2004).

Em cada uma das bacias selecionadas foram coletadas duas amostras de água em diferentes estações climáticas do ano, visto que o clima tropical semi-úmido apresenta sazonalidade de umidade: (i) fevereiro de 2009, final do período úmido; (ii) julho/agosto de 2009, final do período seco. As campanhas de amostragem duraram três dias: (i) de 07 até 09 de Fevereiro e (ii) de 30 de Julho até 01 de Agosto. A opção por duas campanhas de amostragem se deve as características do clima regional. Fevereiro corresponde ao início do fim do período úmido. Logo, os cursos fluviais já estão cheios e os eventos pluviométricos não alteram significativamente sua vazão ou a concentração de íons em suas águas. Já em Julho/Agosto, em plena seca, os cursos fluviais apresentam uma vazão média para este período do ano e não existem riscos de chuvas que possam alterar estas vazões ou as concentrações de íons em suas águas. Por fim, Fevereiro e Julho, representam os opostos do clima regional e com isso, suas vazões quando somadas e divididas, representam uma média aproximada da vazão anual dos cursos fluviais da região (Salgado, 2002).

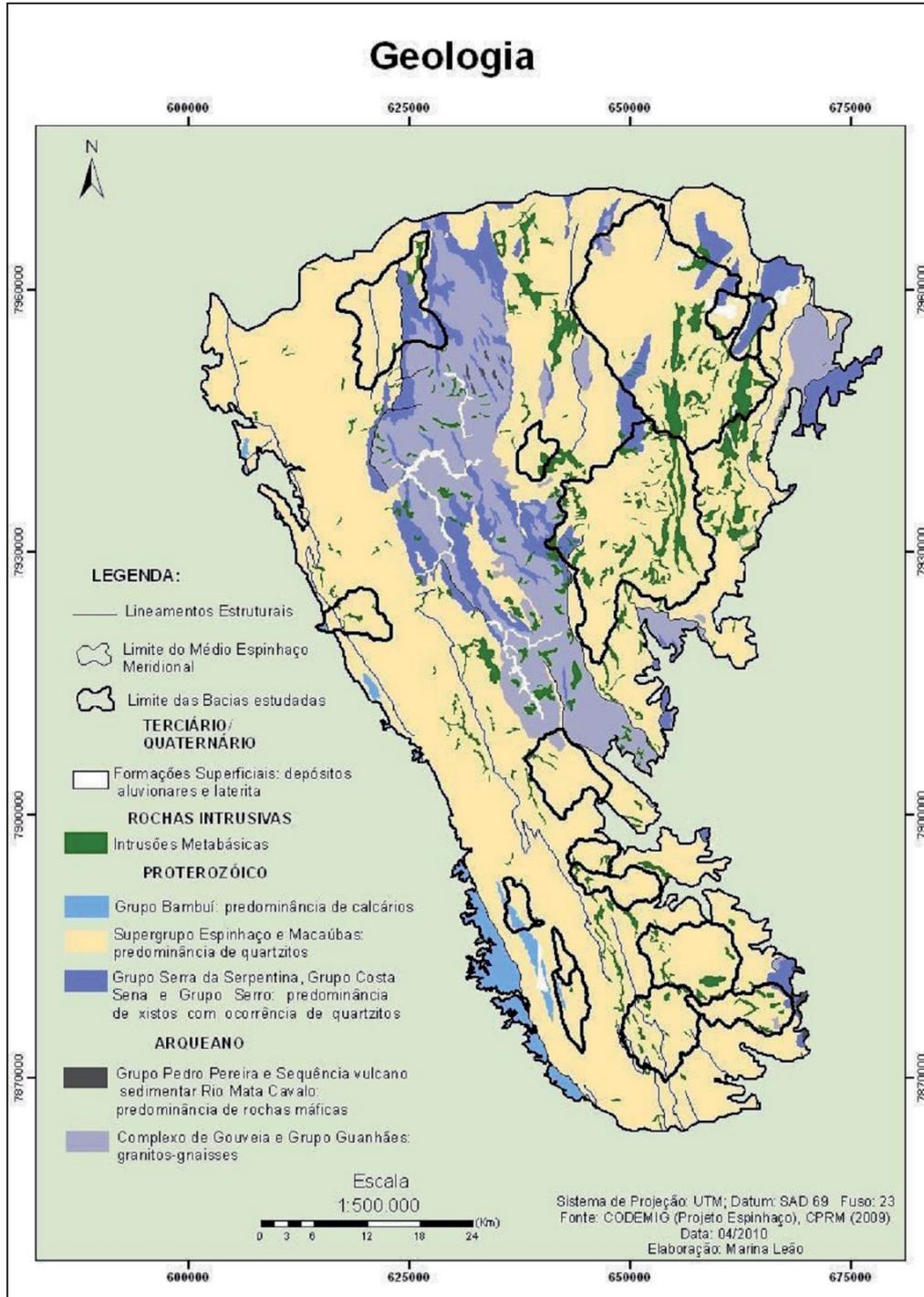


Figura 3 - Geologia da Média Sdem

Paralelamente à coleta das amostras de água, foi mensurada a vazão dos cursos fluviais. Para tanto, os cursos fluviais amostrados tiveram sua largura mensurada no ponto de coleta da água. Após isso, foram realizadas medidas de profundidade de 20 em 20 cm ao longo do perfil transversal no local onde a largura havia sido mensurada. Em cada um dos pontos onde a profundidade foi medida, com auxílio de flutuador, foi calculada a velocidade do fluxo da água daquele trecho do canal. Deste modo, obteve-se, de 20 em 20 cm, vazões parciais do curso fluvial em m/s. A vazão total foi então calculada pelo somatório destas vazões parciais. Já a vazão anual foi mensurada pela média das vazões das duas estações climáticas: período seco e úmido.

As amostras foram coletadas em profundidade média no centro do curso fluvial por meio de siringa ambientada. Foram filtradas em 0,45 µm e condicionadas em frascos plásticos de uso laboratorial de 100 ml, sendo adicionadas duas gotas de ácido nítrico para impedir alterações na composição química das águas. As amostras foram encaminhadas para os laboratórios do LGQA - Laboratório de Geoquímica Ambiental do DEGEO/EM/UFOP em Ouro Preto, onde os elementos Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sc, Si, Sr, Ti, V, Y e Zn foram mensurados via Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma (ICP-OES Spectro Cirrus CCD). Para validação dos resultados, foi utilizado o padrão internacional de água NIST (Standard Reference Material NIST 1643d Trace Elements in Water).

Os elementos químicos acima citados foram somados para calcular o total da carga dissolvida (TDS). Os valores de TDS nas amostras de água foram utilizados para o cálculo da taxa anual de rebaixamento do relevo das bacias hidrográficas investigadas através do método consagrado na literatura geomorfológica internacional (Summerfield, 1991; Thomas, 1994; Burbank e Anderson, 2001). Este cálculo de rebaixamento do relevo se baseia no fato que, ao se medir a vazão dos cursos fluviais em m/s e se obter um valor de TDS em mg/l, é possível se mensurar quantas gramas de íons cada bacia hidrográfica amostrada perdeu por segundo em cada uma das duas estações climáticas. Sendo assim, considerando-se a média das estações e extrapolando-se estes dados de segundos para ano, é possível se estimar quantas toneladas de íons cada bacia amostrada perdeu por ano. Posteriormente, através do conhecimento da densidade da rocha de superfície e da área de cada bacia, torna-se possível calcular o quanto este total de toneladas perdido significa em termos de rebaixamento do relevo em metros por ano. Neste contexto, o cálculo utilizado pode ser resumido da seguinte maneira:

$$DT = (ds * as)$$

$$R = (DT/DR)/A$$

Onde: DT = desnudação total (em toneladas por ano); ds = desnudação por segundo (mensurada em toneladas por segundo); as = quantidade de segundos existentes em um ano (31.557.600 segundos); R = rebaixamento do relevo (em metros por ano); A = área da bacia (em km<sup>2</sup>) e; DR = densidade da rocha de superfície (Como a média SdEM possui diversos tipos de quartzitos, optou-se em trabalhar no cálculo de rebaixamento do relevo com uma densidade média para este tipo de rocha: 2,60).

O total obtido de rebaixamento anual do relevo será um número muito pequeno em termos de metros. Tal fato impossibilita avaliar o significado deste valor em termos de alteração na paisagem. Por esta razão, este valor pode ser extrapolado em metros por milhão de anos, multiplicando-se o rebaixamento mensurado para um ano por um milhão (Summerfield, 1991; Thomas, 1994; Burbank e Anderson, 2001).

Neste ponto, vale ressaltar que este cálculo de desnudação geoquímica não corresponde a um cálculo exato, mas sim a uma aproximação que permite apenas uma comparação entre as bacias investigadas. No entanto, esta aproximação é válida, pois todas as amostras foram coletadas, em cada campanha, num intervalo de tempo de no máximo três dias, sendo que, mesmo na campanha durante o período úmido do ano (fevereiro de 2009) não ocorreram eventos pluviométricos. Sendo assim, a comparação entre as taxas obtidas nas diferentes bacias pode ser realizada.

O Software ArcGis 9.2 foi utilizado para o cálculo das áreas das bacias, bem como para confecção do modelo digital do terreno (MDT), do perfil transversal da SdEM e dos perfis topográficos longitudinais do principal curso d'água de cada uma das 16 bacias analisadas. A base para elaboração destes perfis foram imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Os perfis longitudinais dos 16 canais amostrados foram elaborados no intuito de auxiliar na interpretação dos dados hidroquímicos e indicaram a altimetria e a extensão dos principais rios das bacias analisadas nas duas vertentes da média SdEM. Desta forma, os perfis longitudinais foram colocados em pares – um em cada vertente – seguindo o critério de área da bacia, a fim de obter extensões compatíveis. Os perfis dos cursos fluviais iniciam-se em suas respectivas nascentes e terminam cerca de 1/3 a jusante da distância percorrida até o ponto de coleta, exceto quando o rio deságua em outro canal fluvial. Neste caso, o perfil é interrompido no ponto de encontro entre os cursos fluviais.

## **Apresentação dos Resultados**

### ***Características do relevo regional***

A área de estudo pode ser dividida em duas grandes porções com características distintas, no tocante à morfologia e a estruturação do divisor regional. Na

metade sul da área de estudo o divisor hidrográfico São Francisco/Doce possui direção geral NNW-SSE e está contido em um platô quartzítico posicionado entre 1350 m e 1450 m de altitude, denominado “Planalto Superior da Serra do Cipó” por Rezende & Salgado (2011). À oeste desse platô, na área pertencente à bacia do rio São Francisco, alternam-se cristas quartzíticas e depressões intramontanas elaboradas em rochas mais frágeis, como metapelitos e calcários. Os principais cursos fluviais dessa porção ocidental encontram-se inseridos nas referidas depressões, adaptados à direção da faixa orogênica pré-cambriana e, portanto, paralelos ao divisor regional e às escarpas da SdEM. A rede de drenagem aprisionada no interior das depressões ortoclinais encontra saída em algumas gargantas que seccionam a escarpa ocidental, sendo esta escarpa uma imponente feição com altura média de 400 m. A retilinearidade dessa escarpa indica o seu caráter morfotectônico, já identificado por Saadi (1995), e demonstra que os processos erosivos ali atuantes não tiveram intensidade suficiente para torná-la sinuosa após seu soerguimento.

À leste do divisor regional o platô quartzítico termina bruscamente na escarpa oriental, que possui amplitude altimétrica variável entre 300 m e 600 m e localmente se desdobra em alguns patamares até atingir uma depressão que foi denominada por Rezende & Salgado (2011) como “Depressão Marginal da Serra do Cipó”. Essa escarpa apresenta elevada sinuosidade, sendo recortada por uma série de cânions que denotam o forte recuo erosivo processado por afluentes do rio Santo Antônio.

Na metade setentrional da área de estudo o divisor entre as drenagens interioranas e costeiras sofre uma

inflexão para NE-SW, retomando mais ao norte a direção anterior (NNW-SSE) já na forma do divisor São Francisco/Jequitinhonha. Além disso, a altitude do divisor decai consideravelmente, raramente ultrapassando 1300 m. Esta porção tem como principal particularidade a ocorrência da Depressão de Gouveia, gerada pelo processo de erosão ao longo do eixo de um anticlinório, o que provocou inversão de relevo, com a retirada das camadas superiores e exposição das rochas do embasamento (Augustin *et al.*, 2011). Essa depressão constitui a área mais rebaixada da vertente oeste da SdEM e concentra grande quantidade de voçorocas, feições geradas pelos processos erosivos acelerados ali atuantes.

A vertente oposta é caracterizada por um intenso encaixamento do rio Jequitinhonha, que tem suas nascentes posicionadas próximas de 1300 m de altitude e rapidamente atinge menos de 800 m. Augustin *et al.* (2011) também ressaltam que o desmonte de superfícies erosivas é mais eficiente neste trecho da borda leste do Espinhaço, onde são encontradas as maiores evidências de dissecação.

### Mensuração da atual desnudação geoquímica

Os resultados das análises hidroquímicas são apresentados segundo a localização dos pontos de amostragem (Tabela 1). Para facilitar a análise dos resultados, os pontos foram numerados em pares de área semelhante, sendo cada um localizado em uma das vertentes da SdEM – Doce/Jequitinhonha ou São Francisco.

**Tabela 1 - Amplitude do Relevo, Área, Litologia, Tds e Vazão dos Pontos Amostrados**

Ponto	Nome do curso fluvial	Coordenadas	Amplitude do	Área da	Substrato Geológico (%)					Verão - Úmido		Inverno - Seco	
		Geográficas (UTM)	Relevo (m)	Bacia (km <sup>2</sup> )	Q	X/F	Mb	G/GC	TDS (g/m <sup>3</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	TDS (g/m <sup>3</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	
DJ1	Jequitinhonha	656962; 7964359	603	390,6	78,8	7,6	13,0	0,6	0	5,28	7,982	6,78	0,834
DJ2	Cuba (Três Barras)	659247; 7887565	700	75,42	89,9	0	10,1	0	0	4,71	5,475	6,42	0,665
DJ3	Paraúinha	646757; 7901682	809	51,46	90,9	0	2,8	6,3	0	4,83	0,768	5,92	0,703
DJ4	Mata Cavalos	668280; 7879119	773	41,18	84,1	4,2	9,1	2,6	0	4,57	1,925	6,93	0,760
DJ5	Preto	653409; 7891844	803	28,8	94,3	0	5,7	0	0	4,41	0,433	6,04	0,123
DJ6	Jequitinhonha (nascente)	662716; 7952093	403	20,67	44,5	47,3	8,3	0	0	3,98	0,183	6,35	0,312
DJ7	Fundo (Moinho)	659241; 7955798	352	17,6	81,5	11,5	7,0	0	0	3,86	0,333	5,87	0,037
DJ8	Teodoro (Rabo de Cavalo)	648574; 7896730	739	16,7	92,4	0	7,6	0	0	1,30	3,516	4,96	0,131
SF1	Paraúna	641830; 7935564	347	281,6	81,7	3,5	14,4	0,3	0	4,49	7,073	5,89	1,917
SF2	Areias	627777; 7953451	463	98,4	72,6	18,1	3,2	6,1	0	6,03	2,271	6,51	0,417
SF3	Capivara	649624; 7873418	339	66,43	91,0	2,4	6,6	0	0	3,02	3,901	4,38	0,328
SF4	Fechados	615200; 7921020	805	29,67	70,4	24,9	4,6	0	0	6,53	0,697	15,79	0,130
SF5	Mata-Capim	641412; 7882063	549	29,28	68,6	26,6	0,4	0	4,3	5,23	8,591	13,27	0,202
SF6	Taquara	639940; 7936398	212	17,6	89,1	0	10,9	0	0	5,91	0,575	6,01	0,110
SF7	Lapinha	637543; 7886865	481	14,19	79,0	0	0,4	0	20,6	13,60	1,204	24,99	0,026
SF8	Lajeado	641590; 7882005	544	7,92	59,5	40,5	0	0	0	2,95	0,029	3,96	0,032

Substrato Rochoso: Q= Quartzito; X/F = Xisto/Filito; Mb= Metabásica; G/G= Granito/Gnaiss; C= Carbonáticas

A Tabela 1 permite verificar diferenças entre amplitude do relevo nas duas vertentes da SdEM. Entende-se por amplitude do relevo a diferença entre o ponto altimetricamente mais elevado da bacia hidrográfica e o ponto de coleta de água. A maioria dos principais cursos d'água das bacias de leste apresenta amplitudes superiores às dos respectivos pares de oeste. Em apenas dois canais fluviais (SF4 e SF7) isso não é confirmado. Em média, a diferença é de 180m (Tabela 1).

Tal fato é também verificado através da análise dos perfis fluviais que demonstra que os cursos tributários dos rios Doce/Jequitinhonha apresentam desnível topográfico maior do que os do São Francisco (Figura 4). Assim, os cursos d'água da vertente leste da média SdEM apresentam maior declividade que os das vertente oeste, mostrando-se teoricamente mais agressivos que seus respectivos pares devido ao maior gradiente hidráulico.

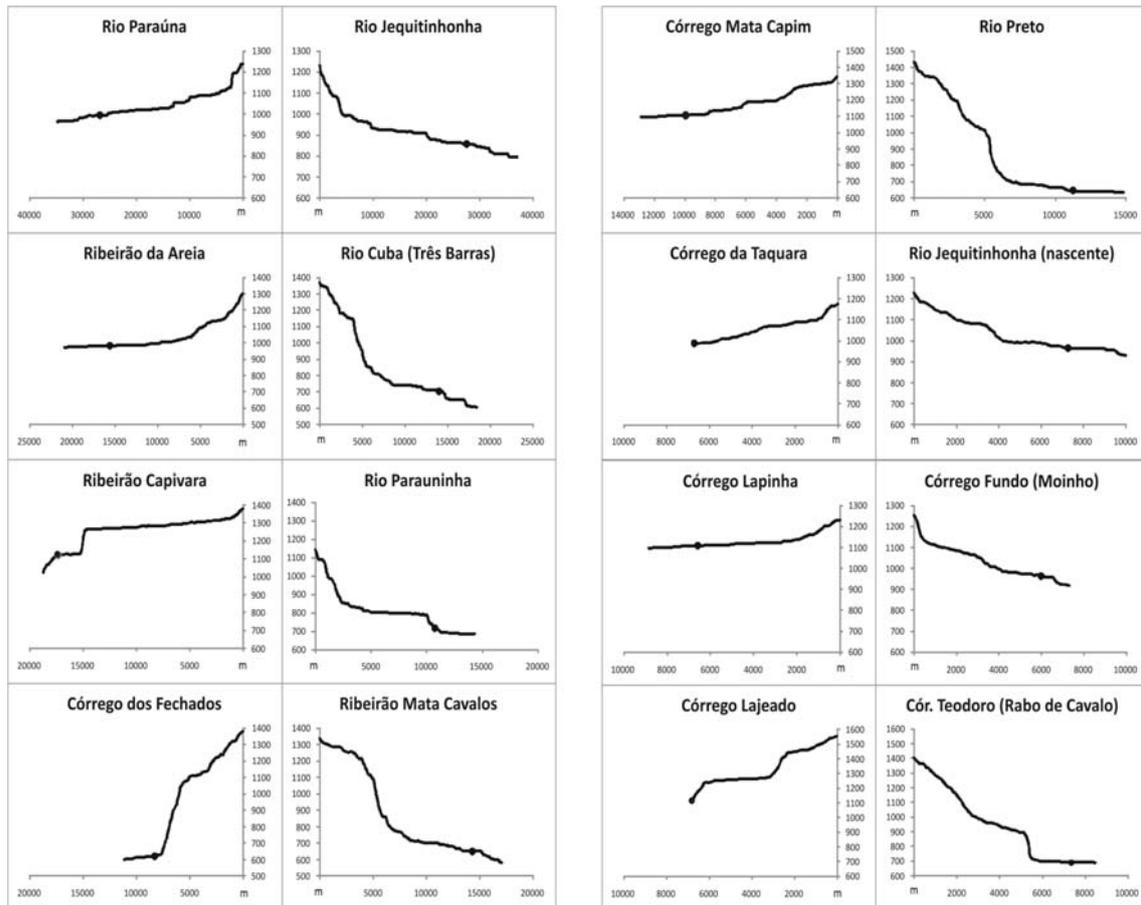


Figura 4 - Perfis Longitudinais dos Cursos Fluviais Amostrados

A mesma tabela permite verificar que, em termos de substrato litológico, o predomínio é de quartzitos. Nas bacias da vertente leste, a ocorrência de quartzitos é superior à encontrada na vertente oeste – média de 82% da superfície das bacias atlânticas e 76,5% das bacias são franciscanas. Este fato faz com que as bacias que vertem para o São Francisco possuam em sua superfície cerca de 5,5% a mais de área com substratos teoricamente mais frágeis frente à desnudação geoquímica: xistos, filitos, granitos/gnaisses, rochas metabásicas e rochas carbonáticas. No entanto, conforme observado por Rezende *et al.* (2010), entre as próprias unidades predominantemente quartzíticas é possível identificar padrões de comportamento diferenciados frente aos processos químicos, como a maior fragilidade das

unidades Itambé do Mato Dentro e Rio Preto, presentes nas sub-bacias do Rio Doce.

A análise da Tabela 1 demonstra ainda variáveis intrinsecamente relacionadas à dupla estacionalidade climática: na estação úmida (verão), os valores da vazão são superiores quando comparados à estação seca (inverno), havendo maior variação naquela estação. As sub-bacias dos rios Doce e Jequitinhonha apresentam, em média, valores de vazão pouco menores que as sub-bacias do rio São Francisco na estação úmida e pouco maiores na estação seca.

Porém, a concentração de sólidos totais dissolvidos (TDS) apresentou comportamento inverso. Para todos os pontos amostrados, a concentração no período seco foi superior a do período úmido, variando esta taxa entre 101 a

380%. No entanto, como as vazões mensuradas na estação úmida (verão) mostram-se muito superiores aquelas medidas no inverno, as taxas de desnudação geoquímica foram

maiores no verão se comparadas ao inverno. Das 16 bacias analisadas, em apenas três a desnudação de inverno é maior que a de verão (Tabela 2).

**Tabela 2 - Desnudação Geoquímica e Rebaixamento Geoquímico do Relevo**

Ponto	Nome do curso fluvial	Área da Bacia (km <sup>2</sup> )	Substrato Geológico (%)					Desnudação Geoquímica			
			Q	X/F	Mb	G/G	C	Úmido (ton/km <sup>2</sup> /ano)	Seco (ton/km <sup>2</sup> /ano)	Total (ton/km <sup>2</sup> /ano)	Rebaixamento geoquímico do relevo (m/Ma)
DJ1	Jequitinhonha	390,6	78,8	7,6	13,0	0,6	0	1,70	0,23	1,93	0,74
DJ2	Cuba (Três Barras)	75,42	89,9	0	10,1	0	0	5,39	0,89	6,28	2,42
DJ3	Parauninha	51,46	90,9	0	2,8	6,3	0	1,14	1,28	2,42	0,93
DJ4	Mata Cavalos	41,18	84,1	4,2	9,1	2,6	0	3,37	2,02	5,38	1,30
DJ5	Preto	28,8	94,3	0	5,7	0	0	1,04	0,41	1,45	0,58
DJ6	Jequitinhonha (nascente)	20,67	44,5	47,3	8,3	0	0	0,56	1,51	2,07	0,80
DJ7	Fundo (Moinho)	17,6	81,5	11,5	7,0	0	0	1,15	0,19	1,35	0,52
DJ8	Teodoro (Rabo de Cavalo)	16,7	92,4	0	7,6	0	0	4,33	0,61	4,95	1,90
SF1	Paradina	281,6	81,7	3,5	14,4	0,3	0	1,78	0,63	2,41	0,93
SF2	Areias	98,4	72,6	18,1	3,2	6,1	0	2,20	0,44	2,63	1,01
SF3	Capivara	66,43	91,0	2,4	6,6	0	0	2,80	0,34	3,14	1,08
SF4	Fechados	29,67	70,4	24,9	4,6	0	0	2,42	1,09	3,51	1,35
SF5	Mata-Capim	29,28	68,6	26,6	0,4	0	4,3	24,20	1,44	25,65	9,86
SF6	Taquara	17,6	89,1	0	10,9	0	0	3,05	0,59	3,65	1,40
SF7	Lapinha	14,19	79,0	0	0,4	0	20,6	18,21	0,73	18,94	7,28
SF8	Lajeado	7,92	59,5	40,5	0	0	0	0,17	0,26	0,43	0,16

Substrato Rochoso: Q= Quartzito; X/F = Xisto/Filito; Mb= Metabásica; G/G= Granito/Gnaiss; C= Carbonáticas

A análise da Tabela 2 demonstra ainda que as bacias que apresentam ocorrência de rochas carbonáticas em seu interior possuem taxas de rebaixamento geoquímico do relevo muito mais elevadas que as demais – 9,86 m/Ma no ponto SF5; 7,28 m/Ma no ponto SF7 – contra, no máximo 2,42 m/Ma nas outras bacias investigadas.

Ressalta-se que as taxas de desnudação geoquímica (Tabela 2) encontradas nas sub-bacias predominantemente quartzíticas (0,16 a 2,42 m/Ma) são bastante semelhantes às taxas de desnudação total obtidas por Salgado *et al.* (2007; 2008) através da mensuração do isótopo cosmogênico <sup>10</sup>Be em sub-bacias constituídas por essa mesma litologia no Quadrilátero Ferrífero (0,29 a 2,35 m/Ma). Esta observação indica que a perda geoquímica é responsável por parcela importante da desnudação em áreas quartzíticas e ainda confirma a validade dos dados apresentados neste trabalho, já que estes são compatíveis com taxas obtidas por outro método de elevada precisão e que abrange uma escala temporal de longo-termo.

## Discussão dos Resultados

A descrição geomorfológica da área permitiu verificar uma situação aparentemente contraditória: a vertente leste da média SdEM é a que apresenta as maiores declividades e os perfis fluviais mais agressivos. Entretanto, é na vertente oeste que são verificadas com mais recorrência e intensidade as geoformas erosivas. Estas geralmente estão associadas a áreas onde afloram litotipos não quartzíticos, principalmente granitos-gnaisses. Neste contexto, torna-se necessário analisar

a descrição da paisagem com base nos dados de desnudação geoquímica.

A análise dos dados hidroquímicos (Tabelas 1 e 2) permite constatar a grande resistência dos quartzitos frente aos processos desnudacionais. As taxas desnudacionais geoquímicas mensuradas nesta pesquisa são baixas e se equiparam às taxas encontradas em outros trabalhos em áreas quartzíticas em Minas Gerais (Salgado & Valadão, 2003; Salgado *et al.*, 2004). Desta forma, confirma-se que a alta resistência dos quartzitos frente aos processos desnudacionais é uma importante razão da SdEM manter-se destacada na paisagem, apesar da orogênese que a originou ser de idade proterozóica.

Observa-se, na vertente do rio São Francisco, uma ocorrência superior em área de rochas não quartzíticas e, portanto, mais frágeis frente aos processos desnudacionais geoquímicos: granito-gnaiss, xistos, filitos e rochas carbonáticas (Figura 3). Esta fragilidade torna-se evidente a partir da análise dos pontos SF 5 e SF 7, onde é possível notar que a influência de rochas carbonáticas em uma pequena área da bacia elevou, em mais de 10 vezes, as taxas de rebaixamento geoquímico do relevo quando comparada ao seu respectivo par da vertente leste (Tabela 2). Desta forma, percebe-se que o condicionante que comanda os processos desnudacionais na média SdEM é a lito-estrutura de forma geral e, de maneira mais contundente, a litologia. Assim, outros fatores ambientais, como o clima, a cobertura vegetal e a morfologia possuem pouca influência nestas taxas quando comparadas à lito-estrutura.

Além disso, ao contrário do verificado em outras regiões (Milliman e Syvitski, 1992; Salgado *et al.*, 2004),

não se encontram relações entre a amplitude do relevo e a área das bacias com as taxas de desnudação e rebaixamento geoquímico do relevo (Tabela 2). Desta maneira, o presente trabalho confirma as observações de Salgado & Valadão (2005), que atestaram que a amplitude do relevo e a área da bacia não eram condicionantes que controlavam as taxas de desnudação geoquímica da SdEM na região do Planalto de Diamantina.

Através da análise das figuras 3 e 4, percebem-se indícios morfométricos de que os processos desnudacionais são mais agressivos na vertente leste da SdEM – Doce/Jequitinhonha. Esta observação foi ressaltada por Saadi (1995) e Valadão (1998). Entretanto, as taxas de desnudação geoquímica obtidas neste trabalho não confirmam tais considerações (Tabela 2). A incompatibilidade entre as taxas desnudacionais geoquímicas mensuradas neste trabalho – taxas, em geral, mais elevadas na vertente oeste – e as análises morfométricas da SdEM – morfologia típica de taxas desnudacionais mais agressivas na vertente leste – pode se dar pela desnudação mecânica que, somada à geoquímica resulta na desnudação total. Em virtude do maior desnível topográfico da vertente leste, uma vez intemperizados, os sedimentos produzidos apresentam maior facilidade de serem transportados mecanicamente. O mesmo não ocorre na vertente oeste que, graças ao mergulho das camadas – mergulho para leste – é constituída de uma série de degraus que estabelecem níveis de base locais, dificultando a desnudação mecânica (Figura 1). Neste contexto, tendo em vista a desnudação geoquímica, a SdEM não apresenta comportamento típico de escarpamento de margem passiva conforme o modelo apresentado por Summerfield (1989, 1991). Esta afirmação baseia-se no fato de que, em termos da atual desnudação geoquímica, a vertente leste – atlântica – não apresenta taxas desnudacionais mais agressivas.

Em virtude das deformações e soerguimentos tectônicos oriundos da orogênese da SdEM, litologias frágeis frente aos processos desnudacionais, como os granitos e gnaisses e as rochas carbonáticas, encontram-se em posições topograficamente elevadas. A erosão, que agiu predominantemente ao longo dos eixos dos anticlinais, removeu os quartzitos, provocando a exumação das rochas mais frágeis, estratigraficamente sobpostas a estes (Augustin & Aranha, 2006). Desta forma, janelas estruturais, como a Depressão de Gouveia, foram constituídas e, uma vez expostas às condições superficiais, as litologias mais frágeis possibilitam a abertura das áreas deprimidas. Os cursos fluviais da vertente interiorana encontram-se, muitas vezes, cortando estas litologias mais frágeis e, devido a soleiras geomórficas, ficam aprisionados correndo numa direção longitudinal a serra, apresentando vales largos, enquanto que os cursos fluviais da vertente atlântica cortam-na transversalmente, entalhando cânions.

As rochas mais frágeis, responsáveis pelas maiores taxas de desnudação geoquímica na vertente são franciscana

da média SdEM, encontram-se parcialmente protegidas da desnudação mecânica por cinturões de quartzitos, que cercam e sustentam estas litologias em patamares mais elevados na paisagem. Entretanto, os quartzitos sobrepostos a litologias mais frágeis frente aos processos desnudacionais, perdem a sua sustentação através da agressividade dos processos em sua base, colapsando. Assim, o desenvolvimento dessas depressões pode se dar pelo mesmo processo de retração das escarpas quartzíticas descrito por Salgado *et al.*, (2007) para as terras altas do Quadrilátero Ferrífero. Os quartzitos desta área apresentam-se resistentes ao rebaixamento vertical do relevo (downwearing) com taxas desnudacionais baixas (1,71 a 2,58m/Ma). Entretanto, graças à fragilidade litológica da base das escarpas, apresentam-se mais susceptíveis ao processo de retração lateral das escarpas (backwearing), com taxas desnudacionais que podem ser de 5 a 9 vezes maiores que aquelas associadas ao downwearing (Salgado *et al.*, 2007). Processos semelhantes a este parecem estar ocorrendo na porção média da SdEM. Sendo assim, a morfologia mais dissecada da vertente Doce/Jequitinhonha pode indicar que, no passado, os processos desnudacionais seriam mais intensos à leste. Entretanto, após a exumação das rochas mais frágeis na vertente são franciscana da SdEM, os processos desnudacionais tem se tornado mais agressivos à oeste.

### **Considerações Finais**

As características tectono-morfo-bio-climáticas do compartimento leste da SdEM, teoricamente, criam condições ambientais que promoveriam um aumento das taxas desnudacionais em relação ao compartimento oeste. Entretanto, percebe-se que, em termos da atual desnudação geoquímica, as duas vertentes apresentam taxas bastante próximas ou até mesmo superiores no compartimento oeste, pertencente à bacia do São Francisco. Isto ocorre em razão de que a litologia possui maior influência na determinação das taxas de erosão e desnudação do que todos os outros fatores conjugados. Como a SdEM tem como principal substrato o quartzito – rocha extremamente resistente – as taxas de erosão e desnudação são baixas, o que contribui para a manutenção deste conjunto de terras elevadas na paisagem. Por esta razão, mesmo que ocorrendo em áreas restritas, a maior quantidade de rochas mais frágeis da vertente oeste possibilita maiores taxas de desnudação geoquímica nesta porção.

Por fim, considerando as análises morfológicas e as taxas desnudacionais geoquímicas mensuradas neste trabalho, é possível supor que, ao longo do tempo geológico, os processos desnudacionais tiveram dois momentos diferenciados, que são demarcados pela exumação das litologias mais frágeis na vertente oeste. Em momento anterior a esta exumação, as taxas desnudacionais provocariam um aprofundamento dos vales em ambas as vertentes, embora pudessem ser mais agressivas na vertente leste. Após a exumação, as

taxas desnudacionais tornam-se maiores na vertente oeste. Entretanto, graças aos cinturões de quartzitos que marcam níveis de base elevados, a desnudação, mais do que entalhar a rede de drenagem, provoca o alargamento dos vales e das janelas estruturais no escarpamento ocidental.

## Agradecimentos

Agradecemos a Capes, ao CNPq e a FAPEMIG pelo financiamento que permitiu o desenvolvimento das pesquisas que resultaram na elaboração deste artigo. Agradecemos a Helen Nébias Barreto pelo apoio nas coletas de água. Agradecemos ainda aos técnicos do Laboratório de Geoquímica Ambiental do DEGEO/UFOP.

## Referências Bibliográficas

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

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. A Ocorrência de Voçorocas em Gouveia, MG: Características e Processos Associados. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1-2, p. 75-86, 2006.

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. 50-90, 2011.

BURBANK, D. W.; ANDERSON, R. S. *Tectonic geomorphology*. Malden: Blackwell Science, 2001. 274 p.

DINIZ, A. D.; OLIVEIRA, C.V.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Relações Solos - Superfícies Geomórficas na Porção Norte da Bacia do Ribeirão Chiqueiro - Gouveia, MG. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 13, n. 1-2, p. 19-27, 2005.

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*. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

KNAUER, L.G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: Considerações sobre sua Estratigrafia e seu Arranjo Estrutural. *Geonomos*, v. 15, n. 1, p. 81-90, 2007.

MILLIMAN, J.D. & SYVITSKI, J.P.M. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountains Rivers. *The Journal of Geology*, v. 100, p. 525-544, 1992.

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

REZENDE, E. A.; LEÃO, M. R.; SALGADO, A. A. R.; OLIVEIRA, C. K. R.; NALINI JÚNIOR, H. A. A influência litológica nas taxas de desnudação geoquímica do médio Espinhaço Meridional/MG. *Sociedade e Natureza*, Uberlândia, v. 22, n. 3, p. 503-514, 2010.

REZENDE, E. A.; SALGADO, A. A. R. Mapeamento de unidades de relevo na média Serra do Espinhaço Meridional - MG. *Geosp*, v. 30, p. 45-60, 2011.

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

SALGADO, A. A. R. Desnudação Geoquímica e Evolução do Relevo no Espinhaço Meridional. 2002. 181f Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

SALGADO, A. A. R.; VALADÃO, R. C. Contribuição da Desnudação Geoquímica para a Erosão diferencial no Espinhaço Meridional/MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Goiânia, v. 4, n. 2, p. 31-40, 2003.

SALGADO A. A. R. & VALADÃO, R. C. Fatores Controladores dos Processos Desnudacionais Geoquímicos no Espinhaço Meridional (Depressão de Gouveia, MG). *Geonomos*, v. 13, n. 1-2, p. 51-57, 2005.

SALGADO, A. A. R.; COLIN, F.; NALINI JR., H. A.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F. D. C. & VARAJÃO, C. A. C. O papel da desnudação geoquímica no processo de erosão diferencial no Quadrilátero Ferrífero. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Goiânia, v. 5, n. 1, p. 55-69, 2004.

SALGADO A. A. R.; VARAJÃO, C.A.C.; COLIN, F.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A.F.D.C.; NALINI JR., H. A.; CHEREM, L.F.S.; MARENT, B.R.; BRINDUSA, C.B. Estimativa das Taxas de Erosão das Terras Altas da Alta Bacia do Rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero: Implicações para a Evolução do Relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 8, n. 2, p. 3-10, 2007.

SALGADO, A. A. R.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; VARAJÃO, VARAJÃO, A. F. D. C.; NALINI JR, H. A. Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (<sup>10</sup>Be) cosmogenic nuclei. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, v. 52, n.3, p. 317-323, 2008.

SUMMERFIELD, M.A. Tectonic Geomorphology - Convergent Plate Boundaries, Passive Continental Margins and Supercontinent Cycles. *Progress in Physical Geography*, v. 13, n.3, p.431-441, 1989.

SUMMERFIELD, M. A. *Global Geomorphology: An introduction of the study of landforms*. New York: Longman Scientific & Technical, 1991. 537 p.

THOMAS, M. *Geomorphology in the Tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1994. 387 p.

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

VALADÃO, R. C. *Evolução de longo termo do relevo do Brasil Oriental: desnudação, superfícies de aplanamentos e soerguimentos crustais*. 1998. 243 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.