

ESTUDO DAS TAXAS DE DENUDAÇÃO QUÍMICA DA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL (MG), COM BASE NA CARGA CATIÔNICA DISSOLVIDA

Helen Nébias BARRETO¹, César Augusto Chicarino VARAJÃO¹, André Augusto Rodrigues SALGADO², Angélica Fortes Drummond Chicarino VARAJÃO¹, Hermínio Arias NALINI JÚNIOR¹

(1) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas - Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Campus Universitário Morro do Cruzeiro S/N. CEP: 35.400-000 - Ouro Preto, MG. Endereços eletrônicos: helennebias@yahoo.com.br;

cesarvarajao@gmail.com; angelicavarajao@gmail.com; nalini@degeo.ufop.br

(2) Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências – Departamento de Geografia. Av. Antônio Carlos, 6.627, Pampulha. CEP: 31270-901 - Belo Horizonte, MG. Endereço eletrônico: geosalgado@yahoo.com.br

Introdução

Caracterização da Serra do Espinhaço Meridional

Procedimentos Metodológicos

Resultados e Discussão

Parâmetros físico-químicos da Serra do Espinhaço Meridional

Quantificação da denudação química com base na carga catiônica dissolvida

Taxa de Rebaixamento Químico

Considerações Finais

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

RESUMO - O presente estudo tem por objetivo investigar processos denudacionais na Serra do Espinhaço Meridional (SdEM), Minas Gerais, visando avaliar comparativamente a dinâmica de evolução do relevo da área limítrofe entre as bacias do Doce, Jequitinhonha e do São Francisco. A metodologia do trabalho baseou-se na mensuração de taxas de denudação a partir da investigação da carga catiônica dissolvida de cursos d'água de vinte seis bacias hidrográficas com substrato litológico predominantemente quartzítico. As análises físico-químicas de águas superficiais foram utilizadas no cálculo da taxa de denudação, que, de modo geral, apresentou-se baixa (3,06ton/km²/ano) devido à alta resistência da litologia. Os resultados apontaram ainda a existência de um processo de denudação diferencial entre as bordas leste (3,72 ton/km²/ano) e oeste (2,41 ton/km²/ano) da SdEM. As sub-bacias do rio São Francisco apresentaram as menores taxas de rebaixamento químico (1,43 m/Ma, nas serras do Cipó e Talhada; e 0,28 m/Ma, no Planalto Diamantina); as sub-bacias do rio Jequitinhonha taxas medianas (0,52 m/Ma); e as sub-bacias do rio Doce as maiores taxas (2,13 m/Ma). Essas taxas podem ser explicadas pelo maior desnível topográfico das bacias e pela tectônica recente.

Palavras-chave: Serra do Espinhaço Meridional, denudação química, evolução do relevo.

ABSTRACT - This study aims to investigate denudational processes in the Southern Espinhaço, Minas Gerais, in order to assess comparatively the dynamics of evolution relief between the basins of the Doce, Jequitinhonha and São Francisco. The methodology of work was based on the measurement of rates of denudation from the geochemical investigation of watersheds of twenty-six basins with quartzite lithology. Chemical analysis of water were used to calculate the rates of geochemical denudation, which generally showed a higher resistance due to the predominant lithology context in which it occurs. The results suggested a process of differential denudation between the eastern and western portions: lower rates of geochemical denudation in São Francisco sub-basins (average 1.43 m/Myr, in the Serra do Cipó and Talhada, and 0.28 m/Ma in the Diamantina Plateau), medium rates in Jequitinhonha sub-basins (0.52 m/Myr), higher rates in

Doce sub-basins (2.13 m/Myr). The higher rates of chemical denudation found in southeastern portion can be explained by higher topographic gradient and by the recent tectonic.

Keywords: Southern Espinhaço, chemical denudation, relief evolution.

INTRODUÇÃO

Os ciclos geoquímicos exógenos que ocorrem nos rios são amplamente controlados pelos equilíbrios químicos em solução e pela interface água-mineral, resultando num conjunto de reações de dissolução (Albarède, 2011). Esse processo de intemperização das rochas constitui o principal processo de transferência de materiais que compõem a carga dissolvida transportada nos cursos d'água. Logo, o monitoramento da carga de solutos em suspensão nas águas fluviais, associados às suas taxas de vazão, representa um dos métodos utilizados para avaliação do intemperismo químico de bacias hidrográficas (Stallard & Edmond, 1983; Drever & Clow, 1995; Edmond *et al*, 1995; Silveira & Coelho Netto, 1999; Mortatti *et al*, 2003; Carmo *et al*, 2005). Os estudos relacionados ao intemperismo químico tornaram-se fundamentais para o entendimento dos processos denudacionais.

Denudação (Carson & Kirkby, 1972; Leeder, 1991) é a perda de material de porções tanto superficiais como subsuperficiais de uma bacia hidrográfica ou de uma paisagem regional. Para Leeder (1991), a denudação química, originária do transporte de material em solução, tem parcela significativa nas alterações do modelado do relevo e no rebaixamento de vertentes. Deste modo, a composição da carga dissolvida de uma bacia hidrográfica pode ser convertida na estimativa de perda da superfície e ser utilizada como taxa ou parâmetro de tempo (Summerfield, 1991).

Do ponto de vista geomorfológico estudos acerca da denudação química em bacias hidrográficas contribuem para as investigações sobre a esculturação do relevo e pelo desenvolvimento de paisagens. De acordo com Pinet & Soriau (1988) e Summerfield, (1991), em escala global, a tectônica é o principal fator de controle das taxas de denudação em bacias hidrográficas, mas em escala local, considera-se o controle litológico e a erodibilidade como fatores determinantes. Milliman & Syvitsky (1992) e Hovius (1998) demonstraram que parâmetros como a área e a elevação máxima em bacias de menor extensão, localizadas em

montanhas tectonicamente ativas, são fatores controladores da denudação, contudo em áreas não tectonicamente ativas observaram notadamente menor influência desses parâmetros na determinação das taxas de denudação.

A área em investigação tem como divisor hidrográfico a Serra do Espinhaço Meridional (SdEM). Estudos realizados em grandes bacias hidrográficas (Pinet & Soriau 1988; Summerfield, 1991; Thomas, 1994) concluíram que em macroescala as taxas de denudação química tendem a ser menores em grandes bacias devido à ocorrência de diferentes litotipos de resistência variada. Investigações acerca do comportamento erosivo de bacias hidrográficas de menor extensão (34 e 134km²) na área de estudo, especificamente na Depressão de Gouveia e seu entorno (Salgado & Valadão, 2003), atestaram que no substrato predominantemente quartzítico das unidades do Supergrupo Espinhaço, as taxas de denudação química são menores do que as encontradas nas áreas topograficamente deprimidas, moldadas sobre os litotipos arqueanos do Complexo Gouveia. Tais resultados sugerem a persistência do relevo planáltico nas bacias hidrográficas, onde predominam os litotipos do Supergrupo Espinhaço. Em estudos semelhantes realizados no Quadrilátero Ferrífero (Salgado *et al*, 2004), evidenciou-se também a resistência erosiva das terras altas, sustentadas por quartzitos e itabiritos, em relação às bacias moldadas sobre xistos e filitos e granito-gnaisses. Outro estudo de desnudação geoquímica na SdEM (Rocha, 2011), aponta que os quartzitos encontram-se em processo de desagregação, devido à expressivo esvaziamento geoquímico e intemperismo de sub-superfície atuantes na região, promovendo o rebaixamento do relevo e formando as superfícies aplainadas.

Dentro dessa perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da atual denudação química em bacias hidrográficas localizadas na porção central do estado de Minas Gerais, tendo como divisor hidrográfico a Serra do Espinhaço Meridional. As sub-bacias

investigadas inserem-se em três grandes bacias hidrográficas: (i) rio São Francisco, na borda oeste; e (ii) rio Doce e (iii) rio Jequitinhonha, na borda leste. Busca-se, então, caracterizar e quantificar, por meio da análise química de águas superficiais, a denudação química e a taxa de rebaixamento geoquímico do relevo. Por apresentar substrato predominantemente quartzítico e topografia elevada, o trabalho

pretende investigar também quais são os fatores responsáveis pela intensidade das taxas de denudação química nas bacias investigadas. Portanto, este estudo visa contribuir para avaliação do comportamento erosivo atual da SdEM, bem como, para um maior conhecimento acerca da evolução geomorfológica das vertentes E e W.

CARACTERIZAÇÃO DA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

A área investigada localiza-se no estado de Minas Gerais (Fig.1) e tem como divisor hidrográfico a Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) que representa a faixa orogênica pré-cambriana mais extensa e contínua do Brasil (Almeida-Abreu & Renger, 2002). A SdEM desenvolveu-se sobre a Plataforma Sul-Americana, cuja evolução geotectônica resultou em três grandes escudos no território brasileiro, dentre eles, o escudo Brasil-Central que se estende pelo interior do Brasil. Sua consolidação ocorreu no Proterozóico Superior com o ciclo Brasileiro (450-700Ma), expressivo evento tectono-magmático de formação de unidades litoestruturais supracrustais, ocorrido na Plataforma Sul-Americana, que resultou na formação de faixas ou regiões dobradas e coberturas plataformais correlatas (Schobbenhaus & Campos, 1984). Durante a evolução desse ciclo, as áreas cratônicas serviram como anteparo para as faixas de dobramento que se estabeleceram às suas margens. A partir de então, desencadeou-

se intenso processo de denudação continental e transporte de sedimentos, a exemplo do Cráton São Francisco que acolheu sedimentos pelítico-carbonáticos do Grupo Bambuí (Saadi, 1995). Nesse contexto, a SdEM permanece soerguida e sob intenso processo erosivo, desde o último ciclo orogênico associado, o Ciclo Brasileiro (Bizzi *et al*, 2003).

As unidades paleo/mesoproterozóicas do Supergrupo Espinhaço (Fig. 2) correspondem ao principal constituinte volumétrico e orográfico desse orógeno (Almeida-Abreu & Renger, 2002). O arcabouço geológico desta unidade é predominantemente quartzítico. Além das rochas quartzíticas ocorrem também na SdEM, subsidiariamente, rochas gnáissicas e granitóides arqueanos do Complexo Gouveia, xistos e filitos, diques básicos e coberturas terciário-quadernárias. As faixas limítrofes leste e oeste correspondem, respectivamente, às unidades arqueanas do Complexo Basal (E) e, as da unidade litológica do Grupo Bambuí (W).

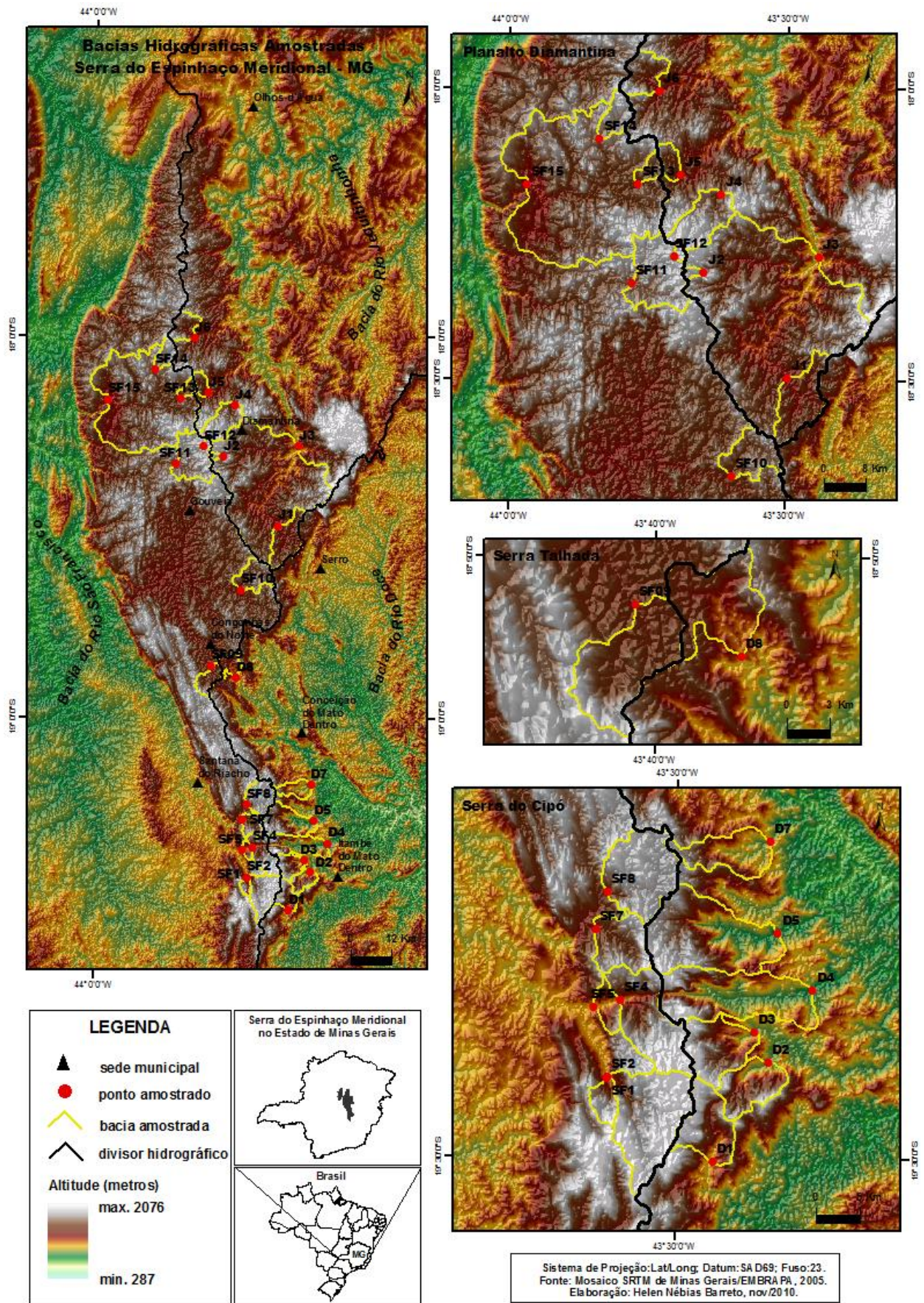


Figura 1. Localização da Serra do Espinhaço Meridional

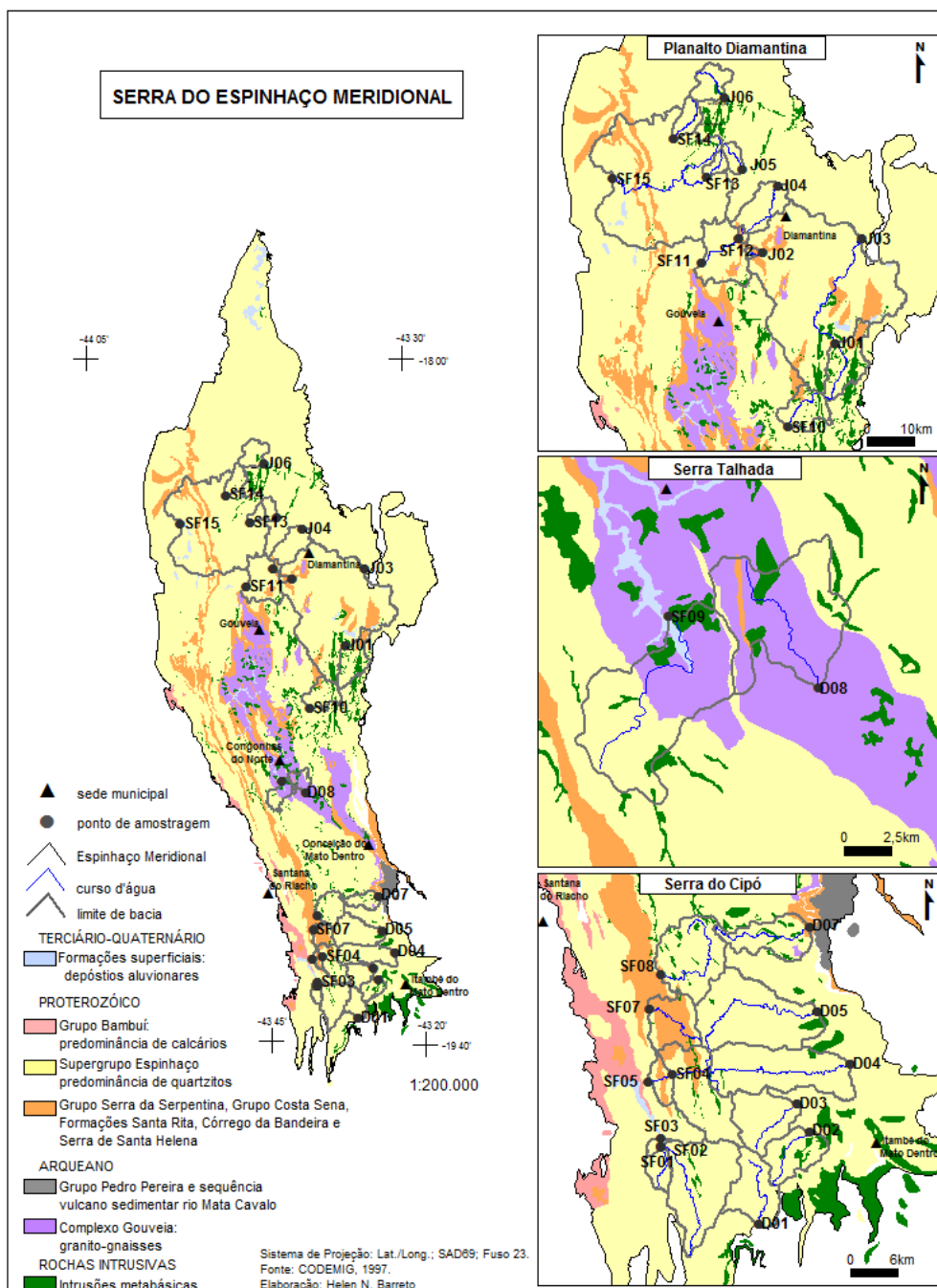


Figura 2. Representação simplificada das unidades geológicas da Serra do Espinhaço Meridional

O Supergrupo Espinhaço está estruturado por um importante sistema de falhas de empurrão/zonas de cisalhamento com direção geral N-S nas suas terminações sul, para a direção E-W, por amplas dobras de eixo que tendem para N-S, abertas, com vergência para W (Fogaça & Schöll, 1984). Na porção sudeste da SdEM observa-se as altitudes menores como consequência da tectônica Quaternária com regime distensivo, responsável pela formação do graben e o sistema de lagos no médio vale do rio Doce (Mello *et al.*, 1999; Suguio & Kohler, 1992).

Geomorfologicamente a SdEM compreende um conjunto de terras altas de direção geral norte-sul e concavidade para oeste (Saadi, 1995). A fisiografia da serra é marcada predominantemente por planaltos, em que se destaca o aspecto densamente fraturado dos quartzitos, resultante do seu comportamento reológico diferenciado com relação às rochas circundantes (Almeida-Abreu, 2005). O relevo escarpado que se eleva a 1200 a 1600 m de altitude da serra é sustentado pelos horizontes de quartzitos, filitos e metaconglomerados (Supergrupo Espinhaço) e as porções

rebaixadas e pouco movimentadas estão reservadas aos terrenos constituídos por rochas graníticas (Complexo Gouveia), com cotas médias de 950 a 1000 m (Almeida-Abreu, 2005). A altitude máxima (2.002m) corresponde ao Pico do Itambé, posicionado a sudeste da cidade de Diamantina. A SdEM constitui um importante divisor hidrográfico entre as bacias atlânticas (do Rio Doce e Jequitinhonha) e a do rio São Francisco.

Em toda a sua extensão, a escarpa da borda oeste constitui uma feição morfotectônica, típica de *front* de cavalgamento, expressão de uma descontinuidade crustal (Oliveira & Alkmim, 1994). A borda leste é marcada pelas intervenções sucessivas de falhas. Ambas compõem o cinturão de cavalgamentos, situado na zona proximal da colisão continental, resultando na edificação do Orógeno Espinhaço (Saadi, 1995). A SdEM é mais estreita ao sul, na Serra do Cipó (~30km), e, apresenta uma maior expressão em área ao norte, no Planalto Diamantina (~90km).

Por meio da análise das principais estruturas regionais, do quadro litológico e da hipsometria, Saadi (1995) observou que as bordas da SdEM são escarpadas, porém, apresentam diferenças morfológicas relacionadas com a posição no contexto regional, destacando-se a seguinte configuração do modelado (figura 3a, 3b e 3c): (i) borda oeste, com uma altitude média de 400m, traçado regular sustentado por pacotes de quartzitos e escarpamento resistente aos processos erosivos e; (ii) borda leste, diferenciada por não apresentar regularidade quanto às formas. Apresenta traçado geral em forma de concavidade voltada para leste, com altitude variável de 100 a 400m. E compõe-se de 2 ou mais degraus, sendo aparentemente resultado da grande variabilidade de resistência das rochas e de estruturas tectônicas e suas direções. Com base nessas características, Saadi (1995) interpretou que estas combinações ocasionam, na borda leste, um avanço diferenciado da frente de dissecação movida pelos afluentes dos rios Doce e Jequitinhonha. Contudo, o estudo referenciado não utilizou métodos quantitativos para avaliação desse comportamento erosivo diferenciado.

A Serra do Espinhaço Meridional se estende dos municípios de Santana do Riacho, ao sul,

até Olhos d'água, ao norte, seguindo aproximadamente o meridiano 43°30' (Grossi-Sad et al., 1997). Dentre as principais cidades, destacam-se: Diamantina, Gouveia, Conceição do Mato Dentro, Santana do Riacho e Itambé do Mato Dentro (Figura 1). Nesta pesquisa optou-se por se trabalhar em três porções ao longo do Espinhaço Meridional: (i) no extremo sul da cordilheira, denominado localmente de Serra do Cipó; (ii) na porção média, na Serra Talhada; e (iii) no norte, denominado como Planalto Diamantina.

Quanto à caracterização bioclimática, a serra representa uma faixa de transição entre os biomas do cerrado, a oeste, com vegetação arbóreo-arbustiva; e, a leste, por formações florestais semidecíduais ou ombrófilas, sendo parte do bioma Mata Atlântica (Schaefer, 2008). Os complexos rupestres representam um bioma à parte com características transicionais entre o cerrado e a mata atlântica. Esta divisão regional de biomas se relaciona ao clima, pois como a serra constitui uma barreira orográfica, a porção leste apresenta maior umidade do que a oeste (Schaefer, 2008).

O clima tropical do sudeste brasileiro predomina na SdEM e, devido às superfícies mais elevadas, apresenta temperatura amena durante todo o ano. Segundo a classificação de Köppen, o clima da Serra do Espinhaço é caracteristicamente mesotérmico brando, tipo *Cwb* (ou intertropical). As temperaturas nos meses de verão variam de 22 a 28°C e o inverno apresenta-se pouco rigoroso, com temperaturas entre 10 e 15°C (Fogaça, 1997). A precipitação anual varia de cerca de 1400 mm a 850 mm (ANA, 2001), do sul para o norte, com verão chuvoso e o inverno seco, com índices medianos superiores a 1000 mm (Grossi-Sad *et al.*, 1997).

A área investigada encontra-se em condições de preservação ambiental, tendo sido o patrimônio natural da Serra do Espinhaço Meridional protegido pela criação de diversas unidades de conservação (IEF, 2005). Destacam-se na porção centro-sul, o Parque Nacional do Cipó e o Parque Estadual Serra do Intendente; e, na porção norte, Parque Nacional das Sempre-Vivas, o Parque Estadual do Rio Preto, o Parque Estadual do Biribiri, entre outras. Atualmente, encontra-se em fase de elaboração o Plano de Ação da Reserva da

Biosfera Serra do Espinhaço (Programa MAB-UNESCO). Além disso, para as áreas restantes, cabe ressaltar que devido a abundância de afloramentos rochosos (quartzitos) os neossolos

desenvolvidos sobre quartzitos e quartzito-xistos são arenosos e com baixa fertilidade, fatos que explicam a baixíssima atividade agrícola na região estudada.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho apoia-se na integração de procedimentos, tais como: (i) interpretação cartográfica de mapeamentos topográficos (1:50.000) do IBGE, de imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) disponibilizadas pela EMBRAPA (Miranda, 2005) e de mapeamentos geológicos (1:100.000) do Projeto Espinhaço (Grossi-Sad *et al.*, 1997); (ii) geração de parâmetros morfométricos das bacias investigadas a partir do Modelo Numérico de Terreno (MNT) e com o auxílio do sistema de informação geográfica ARCGIS 9.2; (iii) realização de trabalhos de campo na área de estudo, que subsidiaram a definição dos pontos de amostragem e as coletas; (iv) análises laboratoriais das águas superficiais; e (v) em dados existentes relacionados às investigações geomorfológicas, litologia, estrutura e tectônica, como fontes auxiliares de informação para interpretação das taxas de denudação geoquímica.

Os pontos de amostragem do trabalho foram definidos em sub-bacias hidrográficas que drenam as duas bordas do Espinhaço Meridional: (i) Leste (Bacias dos rios Doce e Jequitinhonha) e; (ii) Oeste (Bacia do rio São Francisco). Ao todo foram 26 pontos amostrados (Figuras 1 e 2): quatorze na porção sul, serra do Cipó; duas na porção média, serra Talhada e; doze, na porção norte, Planalto Diamantina (figura 4). Os critérios utilizados para seleção das bacias amostradas foram: i)

predominância de litotipos semelhantes; ii) área da bacia; iii) equidistância das bacias do divisor hidrográfico, priorizando as cabeceiras de drenagem.

As unidades litológicas da SdEM foram agrupadas em cinco classes, tendo como referência a base cartográfica digital do mapeamento geológico do Projeto Espinhaço (Grossi-Sad *et al.*, 1997). Como resultado obteve-se as seguintes classes num arranjo simplificado: (i) predomínio de quartzitos; (ii) predomínio de xistos e filitos; (iii) granito-gnaisses; (iv) rochas metabásicas. Assim, realizou-se o cálculo da participação (km² e %) de cada unidade litoestratigráfica (Tabela 1) em relação a área total da bacia hidrográfica. Posteriormente, esses dados foram utilizados para correlação com as taxas de denudação geoquímica das bacias.

Para o cálculo da taxa de rebaixamento do relevo (m/Ma) foram considerados os seguintes valores de densidade (g/cm³) média de cada rocha (Telford, 1990): quartzito (2,65); xistos/filitos (2,69); granito-gnaisses (2,72); metabásicas (2,99). Contudo, devido à ocorrência de mais de um litotipo em algumas bacias, calculou-se a densidade média ponderada do substrato rochoso (D_{mp}) de cada bacia, levando-se em consideração a importância relativa da densidade de cada litotipo dentro da respectiva bacia (Tabela 1).

Tabela 1. Substrato litológico simplificado (%) predominante nas bacias hidrográficas amostradas em relação à área (km²)

Ponto amostrado	Sub-bacia	Substrato litológico (%)			
		Quartzito	Xisto e filito	Metabásica	Granito-gnaisse
Serra do Cipó e Serra Talhada					
D01	Rio do Tanque	97,3	0	0	2,7
D02	Rio Santana	85,2	0	14,8	0
D03	Rio Preto	100	0	0	0
D04	Rio do Peixe	98,5	0	1,5	0
D05	Rio Preto de Cima	96,8	0	3,2	0

D07	Ribeirão Mata Cavalos	84,1	4,2	9,1	1,5
D08	Córrego Lavrinha	24,2	0	6,8	69,0
SF01	Córrego dos Confins	97,5	2,5	0	0
SF02	Ribeirão Bandeirinhas	97,2	0,4	2,5	0
SF04	Rio Bocaina	79,6	15,3	5,1	0
SF05	Rio Bocaina	75,8	19,9	4,3	0
SF07	Rio Indequicé	23,2	73,9	2,9	0
SF08	Rio Capivara	91	2,4	6,6	0
SF09	Ribeirão Congonhas	51,8	0	11,9	36,3
Planalto Diamantina					
J01	Rio Jequitinhonha	68,4	9,8	21,8	0
J02	Córrego Canudos	49,6	50,4	0	0
J03	Rio Jequitinhonha	82,3	11,1	5,8	0,8
J04	Ribeirão das Pedras	98,6	1,4	0	0
J05	Ribeirão de Areia	98,9	0	1,1	0
J06	Ribeirão Macacos	96,1	0	3,9	0
SF10	Ribeirão Tijucal	86,7	0	13,3	0
SF11	Rio Pardo Pequeno	87,1	11,1	1,4	0,4
SF12	Córrego do Pasmarr	37,28	62,63	0	0
SF13	Córrego das Begônias	99,3	0	0,6	0
SF14	Rio Pardo Grande	98,7	0	1,3	0
SF15	Rio Pardo Grande	80,6	18,4	1	0

Os dados referentes à localização dos pontos de amostragem da Serra do Espinhaço Meridional são apresentados na tabela 2. As bacias hidrográficas do rio Doce apresentam área variando entre 32,2 km² e 106,5 km², enquanto as bacias hidrográficas do rio São Francisco variam entre 12,6 km² e 84,9 km². Destacam-se também as bacias SF09 e D08,

que se diferenciam das demais, tendo por substrato quartzitos e granito-gnaisses do Complexo Gouveia. No Planalto Diamantina, as áreas das bacias hidrográficas variam entre 6,4 km² e 911,7 km² do rio Jequitinhonha, e 6,2 km² e 733,9 km² na do rio São Francisco. A altitude máxima média do divisor nessa região é de 1.432 m.

Tabela 2. Dados das bacias hidrográficas da Serra do Espinhaço Meridional

Código	Curso d'água	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Área (Km ²)
		SAD69 (graus decimais)	SAD69 (graus decimais)		
Serra do Cipó e Serra Talhada					
D01	Rio do Tanque	-19,504178	-43,45989	768	41,77
D02	Rio Santana	-19,401618	-43,40035	656	34,77
D03	Rio Preto	-19,371332	-43,41569	671	45,01
D04	Rio do Peixe	-19,327154	-43,35257	589	92,48
D05	Rio Preto de Cima	-19,268859	-43,39069	587	106,5
D07	Ribeirão Mata Cavalos	-19,174664	-43,40000	628	41,32
D08	Córrego Lavrinha	-18,895532	-43,61026	778	32,17
SF01	Córrego dos Confins	-19,418823	-43,57614	804	12,56
SF02	Ribeirão Bandeirinhas	-19,417567	-43,57572	797	84,89
SF04	Rio Bocaina	-19,338524	-43,56244	800	66,02
SF05	Rio Bocaina	-19,346036	-43,59071	794	78,49
SF07	Rio Indequicé	-19,265994	-43,58967	988	36,36
SF08	Rio Capivara	-19,227631	-43,57694	1113	66,63

SF09	Ribeirão Congonhas	-18,863637	-43,68078	1035	40,3
Planalto Diamantina					
J01	Rio Jequitinhonha	-18,496547	-43,49819	906	99,63
J02	Córrego Canudos	-18,315596	-43,65033	1264	6,367
J03	Rio Jequitinhonha	-18,287900	-43,44206	723	911,7
J04	Ribeirão das Pedras	-18,181599	-43,62019	1077	83,05
J05	Ribeirão de Areia	-18,149172	-43,69335	1022	22,62
J06	Ribeirão Macacos	-18,005701	-43,73237	935	53,36
SF10	Ribeirão Tijucal	-18,664776	-43,59834	1030	73,12
SF11	Rio Pardo Pequeno	-18,336179	-43,78010	1153	131,8
SF12	Córrego do Pasmarr	-18,288937	-43,70332	1300	6,294
SF13	Córrego das Begônias	-18,164859	-43,76996	1091	18,74
SF14	Rio Pardo Grande	-18,089152	-43,83908	1184	36,99
SF15	Rio Pardo Grande	-18,167377	-43,97082	923	733,9

As amostras das águas fluviais foram coletadas nas duas estações, chuvosa e seca, para registrar a influência de ambos os períodos climáticos. A amostragem da estação chuvosa foi realizada em fevereiro de 2009 e janeiro de 2010 e, da estação seca, em agosto de 2009 e julho de 2010. A água foi amostrada no meio do canal fluvial em profundidade média, com auxílio de seringa (250ml), ambiente *in loco* com a água do próprio curso d'água. Em seguida, as amostras foram filtradas com filtros descartáveis de 0,45µm, para retirada de partículas em suspensão, armazenadas em frascos de polietileno Nalgene de uso laboratorial (30ml) e submetidas a refrigeração. Como medida preventiva, no intuito de evitar a floculação ou a adsorção de metais da água amostrada, foram adicionadas duas gotas de ácido nítrico (HNO₃) a cada amostra, levando o pH a valores <2. As amostras foram acondicionadas em isopor e conservadas sob refrigeração até o procedimento de análise laboratorial.

Com o auxílio do equipamento multiparâmetro (Modelo Myron Ultrameter 6P) foram mensurados *in loco* o parâmetro pH, cujo sensor foi calibrado utilizando-se soluções com valores de pH 4,00; 7,00 e 9,00. Os elementos maiores e menores, como o Al, As, Ba, Ca, Cd, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, S, Si, Sr e Zn foram mensurados no laboratório de Geoquímica Ambiental (LGqA) do Departamento de Geologia/Escola de Minas/UFOP, por espectrometria de emissão atômica por plasma (ICP-OES Spectro Cirrus CCD). Para validação dos resultados, foi usado o standard NIST 1653.

O método para determinação da vazão (Q) dos cursos d'água foi por medição das velocidades do fluxo da água. A princípio, consistiu no uso de flutuadores, com o tempo de deslocamento cronometrado numa seção do rio (distância fixa) marcada com referências na margem do rio. A partir da determinação da velocidade do fluxo (m/s), em diversos pontos do curso d'água, foi usado o método de integração por vertical que consistiu na construção, para cada ponto do rio onde foi medida a velocidade (V), uma seção vertical integrando os dados de profundidade média (P_m) e da largura (L) do canal fluvial, para determinação da vazão média do curso em m³/s (Tucci, 2002). A equação para a medição da vazão foi:

$$Q = L \times P_m \times V$$

Os dados acima serviram de base para mensuração da denudação química das bacias amostradas. O método utilizado para se quantificar a taxa de denudação química em bacias hidrográficas consiste na mensuração de sólidos totais dissolvidos (TDS) em cursos d'água, em estações climáticas distintas do ano. Esse método tem sido adotado para pesquisa geomorfológica por diversos pesquisadores como Pinet & Soriau, 1988; Summerfield, 1991a; e Thomas, 1994. Os sólidos totais dissolvidos (TDS) foram mensurados a partir da carga catiônica dissolvida, para as estações chuvosa e seca, dados em ton/m³. Para o cálculo da taxa de denudação química utilizou-se a equação adaptada de Thomas (1994):

$$D = \left(\frac{TDS_{chuvosa} \times V_{chuvosa}}{A} \times S_{chuvosa} \right) + \left(\frac{TDS_{seca} \times V_{seca}}{A} \times S_{seca} \right)$$

Onde D = é a taxa de denudação química anual (estações chuvosa e seca), dada em $ton/km^2/ano$; TDS = é a carga catiônica dissolvida na água (chuvosa e seca), dada em ton/m^3 ; V = é a vazão medida em campo, dada em m^3/s ; s = tempo medido em segundos do período amostrado ($1,5778 \cdot 10^7 s$); e A = é a área da bacia hidrográfica, dada em km^2 . Para a determinação da denudação química foi utilizado o balanço anual de cátions, conforme estudos na literatura geomorfológica de quantificação de carga dissolvida para determinação da denudação química em bacias hidrográficas de cadeias montanhosas (Baron & Bricker, 1987; Mast *et al.*, 1990; Caine & Thurman, 1990; Caine, 2001; Caine, 2004). Apesar de Stallard & Edmond (1981) e Mortatti (1997) mostrarem a importância da contribuição do fluxo de entrada atmosférica e entrada antrópica, nesse trabalho foram

considerados apenas dados relativos ao fluxo de sólidos totais dissolvidos das águas fluviais.

A perda vertical, que representa a taxa de rebaixamento do relevo (R) da bacia (Summerfield, 1991; Thomas, 1994; Burbank & Anderson, 2001), comumente é expressa em metros por milhão de anos. Esse método propõe que caso $1km^2$ das superfícies das áreas continentais perca anualmente uma massa equivalente à densidade (ρ) de sua rocha constituinte em toneladas, ao final de 1 milhão de anos, tal superfície terá sido rebaixada verticalmente em 1 metro. O cálculo baseia-se:

$$R = \frac{D}{\rho}$$

Onde R = é a taxa de rebaixamento do relevo, dada em m/Ma ; D = é a denudação química anual, dada em $ton/km^2/ano$; e ρ = é densidade média ponderada da rocha constituinte da bacia (Tabela 1).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parâmetros físico-químicos da Serra do Espinhaço Meridional

Nas tabelas 3a e 3b constam os resultados para os parâmetros determinados nas águas fluviais das bacias hidrográficas investigadas, durante os períodos chuvoso e seco. Os valores apresentados nas tabelas mostram que as vazões medidas em todos os pontos de amostragem são

mais elevadas nos meses de janeiro e fevereiro, em relação aos demais meses de coleta. O valor médio de pH (6,41) obtido em todas as bacias indica predominantemente que as águas são ácidas, com tendência à neutralidade. No ponto SF09 valores de pH ligeiramente inferiores foram encontrados na época de chuva (4,84) e na época de seca (5,04).

TABELA 3a: Concentração de cátions, pH e TDS das bacias hidrográficas da Serra do Cipó e Serra Talhada por estação climática

Bacia	Ponto de Amostragem	Estação	Vazão Fluvial (m ³ /s)	pH	Al (mg/L)	As (mg/L)	Ba (mg/L)	Ca (mg/L)	Cd (mg/L)	Fe (mg/L)	K (mg/L)	Li (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Na (mg/L)	Si (mg/L)	Sr (mg/L)	TDS (mg/L)	
Bacia do Rio Doce	D01	úmido	2,510	6,9	0,0165	<LQ	0,0047	1,0910	<LQ	0,1973	0,3290	<LQ	0,6300	0,0178	0,4717	2,7430	0,0040	5,505	
		seco	1,517	6,75	<LQ	<LQ	0,0071	1,3110	<LQ	0,1011	0,5650	<LQ	0,7800	0,0060	0,4486	3,9590	0,0046	7,183	
	D02	úmido	3,983	6,43	0,0227	<LQ	0,0031	0,9750	<LQ	0,2441	0,1827	<LQ	0,5970	0,0275	0,5680	3,1410	0,0048	5,766	
		seco	0,720	6,75	<LQ	<LQ	0,0073	2,2690	<LQ	0,0432	0,5270	<LQ	1,3940	0,0072	0,5340	3,8020	0,0071	8,591	
	D03	úmido	1,968	6,13	0,0145	<LQ	0,0029	1,0010	<LQ	0,1144	0,1652	<LQ	0,6530	0,0108	0,5400	2,6320	0,0044	5,138	
		seco	0,613	6,35	<LQ	<LQ	0,0038	0,3002	<LQ	0,0402	0,3570	<LQ	0,3097	0,0023	0,2381	3,3550	0,0025	4,659	
	D04	úmido	4,266	6,61	0,0512	<LQ	0,0060	0,2963	<LQ	0,1476	0,4231	<LQ	0,2102	0,0097	0,1968	2,2700	0,0017	3,613	
		seco	0,995	6,44	<LQ	<LQ	0,0096	0,7330	<LQ	0,0666	0,6230	<LQ	0,5070	0,0053	0,2234	3,1030	0,0032	5,274	
	D05	úmido	3,599	6,35	0,0862	0,0373	0,0035	0,2716	<LQ	0,1639	0,3188	<LQ	0,1903	0,0095	0,1824	1,4480	0,0017	2,713	
		seco	1,315	6,78	0,01001	<LQ	0,0055	0,9310	<LQ	0,0694	0,4521	<LQ	0,6630	0,0042	0,2378	2,961	0,0039	5,338	
	D07	úmido	1,925	6,46	0,0265	<LQ	0,0046	0,7760	<LQ	0,1469	0,3752	<LQ	0,5040	0,0099	0,3359	2,3840	0,0040	4,567	
		seco	0,760	7,15	<LQ	<LQ	0,0072	1,5450	<LQ	0,0716	0,4763	<LQ	1,0150	0,0053	0,3322	3,4670	0,0066	6,926	
	D08	úmido	0,772	7,01	0,0145	<LQ	0,0044	0,6710	<LQ	0,0728	0,7240	<LQ	0,4037	0,0040	1,1860	4,1500	0,0051	7,235	
		seco	0,375	6,8	<LQ	<LQ	0,0058	0,7180	0,0093	0,0475	0,7240	<LQ	0,4070	0,0027	1,4700	2,3700	0,0049	5,756	
	Bacia do Rio São Francisco	SF01	úmido	0,789	6,7	0,0547	0,0375	0,0031	0,1266	<LQ	0,0237	0,3845	<LQ	0,0908	0,0019	0,1651	2,3560	0,0008	3,244
			seco	0,246	6,03	<LQ	<LQ	0,0039	0,2574	<LQ	0,0102	0,5280	<LQ	0,1570	<LQ	0,1235	3,8670	0,0012	4,948
SF02		úmido	2,752	6,8	0,0627	<LQ	0,0020	0,1807	<LQ	0,1178	0,1464	<LQ	0,1195	0,0028	0,1733	1,8080	0,0012	2,614	
		seco	0,560	6,82	<LQ	<LQ	0,0031	0,3560	<LQ	0,0483	0,2299	<LQ	0,2530	<LQ	0,2644	3,3020	0,0022	4,459	
SF04		úmido	4,098	6,41	0,06988	<LQ	0,0025	0,2630	<LQ	0,1372	0,1687	<LQ	0,1971	0,0030	0,3099	2,0840	0,0019	3,237	
		seco	0,193	6,62	<LQ	<LQ	0,0023	0,5160	<LQ	0,0590	0,1795	<LQ	0,3975	<LQ	0,4421	3,7410	0,0033	5,341	
SF05		úmido	1,503	6,01	0,0654	<LQ	0,0027	0,2734	<LQ	0,1607	0,2647	<LQ	0,2013	0,0036	0,3359	2,2520	0,0019	3,562	
		seco	0,357	6,52	<LQ	<LQ	0,0031	0,5070	<LQ	0,0638	0,3140	<LQ	0,3924	0,0020	0,4469	3,8050	0,0033	5,537	
SF07		úmido	1,796	6,2	0,0409	<LQ	0,0039	0,3772	<LQ	0,1082	0,4136	<LQ	0,1162	0,0053	0,2566	1,9280	0,0028	3,253	
		seco	0,240	7,08	<LQ	<LQ	0,0057	0,3842	<LQ	0,0449	0,4832	<LQ	0,1282	0,0027	0,3257	3,6360	0,0030	5,014	
SF08		úmido	3,901	6,55	0,0928	<LQ	0,0029	0,2538	<LQ	0,3028	0,1765	<LQ	0,1377	0,0091	0,2708	1,7760	0,0022	3,024	
		seco	0,320	6,6	<LQ	<LQ	0,0021	0,3476	<LQ	0,0931	0,2614	<LQ	0,2555	0,0019	0,3571	3,061	0,0028	4,382	
SF09		úmido	4,228	4,84	0,0359	<LQ	0,0061	0,5470	<LQ	0,1925	0,4010	<LQ	0,3264	0,0146	0,7220	2,8730	0,0048	5,123	
		seco	0,287	5,04	0,0196	<LQ	0,0062	1,1900	<LQ	0,3342	0,4010	0,0028	0,7600	0,0057	2,1200	2,1000	0,0064	6,949	

TABELA 3b: Concentração de cátions, pH e TDS das bacias hidrográficas do Planalto Diamantina por estação climática

Bacia	Pontos	Estação	Vazão Fluvial (m ³ /s)	pH	Al (mg/L)	Ba (mg/L)	Ca (mg/L)	Fe (mg/L)	K (mg/L)	Li (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Na (mg/L)	S (mg/L)	Si (mg/L)	Sr (mg/L)	Zn (mg/L)	TDS (mg/L)
Bacia do Rio Jequitinhonha	J01	úmido	0,695	6,43	0,0405	0,0058	0,8340	0,3604	0,1527	<LQ	0,5760	0,0434	0,5380	<LQ	2,1270	0,0064	<LQ	4,684
		seco	0,157	6,55	<LQ	0,0053	1,2350	0,4411	0,2330	<LQ	0,9280	0,0232	0,8250	<LQ	3,5170	0,0091	<LQ	7,217
	J02	úmido	0,220	6,30	0,0699	0,0020	0,1417	0,1350	0,0839	<LQ	0,0681	0,0179	0,1826	<LQ	1,5350	0,0013	<LQ	2,237
		seco	0,045	6,14	<LQ	0,0025	0,2204	0,0387	0,1023	<LQ	0,1749	0,0060	0,2217	<LQ	3,1990	0,0017	<LQ	3,967
	J03	úmido	25,000	7,03	0,0345	0,0056	0,7370	0,2808	0,2393	<LQ	0,3188	0,0400	0,5340	<LQ	1,8890	0,0050	<LQ	4,084
		seco	2,516	6,81	<LQ	0,0055	1,1310	0,0889	0,5620	<LQ	0,5800	0,0332	1,5150	0,0941	3,4980	0,0068	<LQ	7,514
	J04	úmido	1,497	7,37	0,0184	0,0024	0,9100	0,2200	0,2908	<LQ	0,1379	0,0121	0,7230	<LQ	2,2700	0,0053	<LQ	4,590
		seco	0,377	6,66	<LQ	0,0022	0,9020	0,0959	0,4369	<LQ	0,1721	0,0083	1,7640	0,1494	3,0300	0,0048	<LQ	6,566
	J05	úmido	0,506	4,7	0,1138	0,0015	0,1137	0,3517	0,0738	<LQ	0,0613	0,0106	0,1442	<LQ	1,6370	0,0009	<LQ	2,509
		seco	0,042	5,89	<LQ	0,0013	0,0645	0,0476	0,0637	<LQ	0,0637	0,0037	0,1717	<LQ	3,676	0,0008	<LQ	4,092
	J06	úmido	0,511	6,6	0,0251	0,0020	0,9110	0,1764	0,1666	<LQ	0,6140	0,0255	0,4732	<LQ	2,3160	0,0038	<LQ	4,714
		seco	0,278	6,59	<LQ	0,0015	0,3361	0,0949	0,9420	<LQ	0,2993	0,0124	0,3562	<LQ	3,4340	0,0018	<LQ	5,478
Bacia do Rio São Francisco	SF10	úmido	0,756	6,72	0,0124	0,0086	0,5390	0,0696	0,3010	<LQ	0,2875	0,0413	0,4806	<LQ	2,2670	0,0034	0,0047	4,015
		seco	0,439	6,2	<LQ	0,0113	0,8060	0,0714	0,3010	0,0021	0,4780	0,0149	1,6800	<LQ	1,3700	0,0039	<LQ	4,736
	SF11	úmido	0,242	6,74	0,1218	0,0029	0,0864	0,2569	<LQ	<LQ	0,0530	0,0080	0,1324	<LQ	1,4480	0,0012	<LQ	2,111
		seco	0,037	6,03	0,0177	0,0022	0,1557	0,1088	0,0700	<LQ	0,1684	0,0061	0,2268	<LQ	3,6330	0,0014	<LQ	4,390
	SF12	úmido	0,059	7,4	0,0563	0,0012	0,1802	0,1020	0,0945	<LQ	0,0721	0,0052	0,2421	<LQ	1,7220	0,0015	<LQ	2,477
		seco	0,014	6,42	<LQ	0,0027	0,2538	0,0351	0,1444	<LQ	0,1686	0,0032	0,2440	<LQ	3,3600	0,0024	<LQ	4,214
	SF13	úmido	0,007	4,6	0,1354	0,0011	0,1395	0,2696	<LQ	<LQ	<LQ	0,0034	0,1130	<LQ	0,6200	0,0011	<LQ	1,283
		seco	0,068	6,59	<LQ	0,0025	0,2802	0,1175	0,0972	<LQ	0,2869	0,0310	0,2357	<LQ	3,5760	0,0018	<LQ	4,629
	SF14	úmido	0,273	5,00	0,0867	0,0024	0,0808	0,3074	0,0774	<LQ	0,0472	0,0237	0,1670	<LQ	0,8680	0,0009	<LQ	1,661
		seco	0,100	6,27	<LQ	0,0023	0,1379	0,0182	0,0484	<LQ	0,1449	0,0150	0,2204	<LQ	3,4200	0,0010	<LQ	4,008
	SF15	úmido	23,428	6,9	0,1177	0,0042	0,2655	0,4023	0,3541	<LQ	0,1925	0,0205	0,4690	<LQ	1,9190	0,0015	<LQ	3,746
		seco	2,255	6,71	0,0073	0,0042	0,6400	0,0609	0,3731	<LQ	0,5150	0,0104	0,2973	<LQ	3,5280	0,0020	<LQ	5,438

Os valores dos elementos Al, As, Ba, Cd, Li, Mn e Sr (Tab.3a) apresentaram-se muito baixos para os pontos monitorados nas bacias do rio Doce e São Francisco na Serra do Cipó e Talhada, muitas vezes inferiores ao limite de detecção (0,001mg/L). No Planalto Diamantina, os valores dos elementos para Al, Ba, Li, Mn, S, Sr e Zn (Tab.3b) também foram muito baixos em todos os pontos monitorados. Os elementos Ca, Fe, Mg e K apresentaram-se mais elevados em relação aos com menores valores.

Os valores de Fe (média de 0,144mg/L) foram mais elevados na estação chuvosa. O Na (média de 0,486mg/L) apresentou-se mais elevado que o Fe e destacou-se na estação seca nas bacias D08 (1,47mg/L) e SF09 (2,12mg/L) que drenam granito-gnaisses e quartzitos. A lixiviação da sílica (média de 2,68mg/L) apresentou-se elevada para todas as bacias em virtude do substrato predominantemente quartzítico. Os valores de Si foram homogêneos para todos os pontos monitorados, inclusive nos D08 e SF09.

Nas serras do Cipó e Talhada a concentração de sólidos totais dissolvidos (TDS) foi mais elevada nas bacias do rio Doce (5,59mg/L) em relação às bacias do rio São Francisco (4,33mg/L). Nas bacias D08 e SF09 os valores foram superiores à média das respectivas bacias, demonstrando a influência das rochas da unidade litológica do Complexo Gouveia.

Quantificação da denudação química com base na carga catiônica dissolvida

A denudação química anual, obtida por meio da concentração de sólidos totais dissolvidos, e a vazão nas estações chuvosa e seca são apresentadas nas figuras 3 (Serra do Cipó e Serra Talhada) e 5 (Planalto Diamantina). Os pontos monitorados apresentados na figura 3 mostram as taxas de denudação para as sub-bacias da Serra do Cipó e Serra Talhada. Nota-se que as taxas das sub-bacias do rio Doce, com média de 5,71 ton/km²/ano, são superiores às das sub-bacias do rio São Francisco, com média de 3,84 ton/km²/ano, evidenciando maior denudação química na bacia do rio Doce.

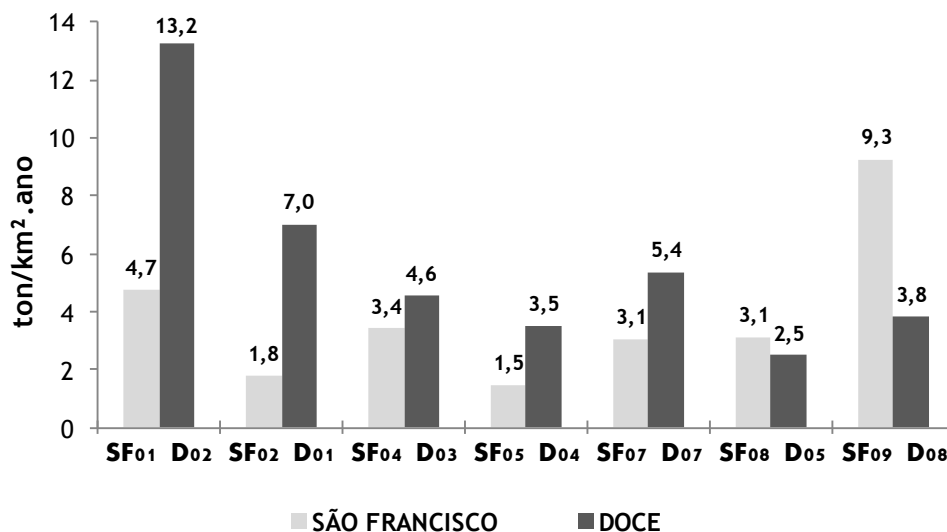


Figura 3. Variação da Denudação Química Anual dos pontos amostrados na bacia do rio Doce e do rio São Francisco

Contudo, nas sub-bacias da Serra Talhada, onde os granito-gnaisses do Complexo Gouveia representam 69% na D08 e 36,3% na SF09 do substrato litológico das bacias, a denudação se mostra superior na bacia do rio São Francisco. Isso pode ser explicado por meio da análise do perfil longitudinal do ribeirão Congonhas (SF09) que apresenta duas rupturas de declive em seu curso, sugerindo, portanto, maior erosão

em relação à bacia do córrego Lavrinha (D08), cuja escarpa apresenta morfologia mais suavizada. Observou-se também que, mesmo apresentando variação litológica, a denudação da bacia D08 assemelha-se à quantificação geral daquelas situadas em substrato predominantemente quartzítico.

A bacia do rio Santana (D02) apresentou denudação química de 13,2 ton/km²/ano, valor

superior às demais bacias investigadas. Trata-se de bacia com presença de feições cársticas nos quartzitos do Supergrupo Espinhaço, cuja gênese e dinâmica vêm sendo estudadas por meio de avaliação espeleológica (Fabri *et al.*, 2010). Nessa área foram reconhecidas grutas e diversas cavidades de importante dinâmica hidrológica, o que sugere maior taxa de denudação nessa bacia em relação às demais.

Observou-se também que a taxa de denudação química das bacias hidrográficas não apresentou um padrão em relação ao tamanho da área. As maiores sub-bacias não indicaram as maiores taxas de denudação, enquanto as sub-bacias de menor área tiveram comportamento variado em relação às taxas de denudação. Essa análise pode ser explicada por meio das observações realizadas por Summerfield & Hulton (1994) ao investigarem a denudação dos maiores rios do mundo. A partir da mensuração da denudação, em conjunto com a análise dos principais parâmetros morfométricos, concluíram que a

área da bacia não apresenta correlação direta com a intensidade das taxas de denudação, não sendo, portanto, o parâmetro mais relevante na diferenciação do comportamento denudacional de bacias hidrográficas.

A análise dos perfis longitudinais dos cursos d'água (Figura 4) das sub-bacias do rio Doce revela sub-bacias com dois a três níveis altimétricos em relação às sub-bacias do rio São Francisco. Tal configuração, como observado na bacia do rio Santana (D02), pode implicar em mudanças do gradiente do talvegue e, conseqüentemente, na elevação das taxas de denudação dessas bacias. O desnível topográfico dos cursos d'água das sub-bacias do Doce é maior, cerca de 850 m, enquanto no rio São Francisco é de 690 m, uma diferença de 160m entre as duas bacias. Pode-se supor que a maior capacidade erosiva das sub-bacias do rio Doce seria resultado da conjunção de dois fatores: maior desnível topográfico e a existência de pontos de inflexão (*knickpoints*) nos perfis dos talvegues dos rios.

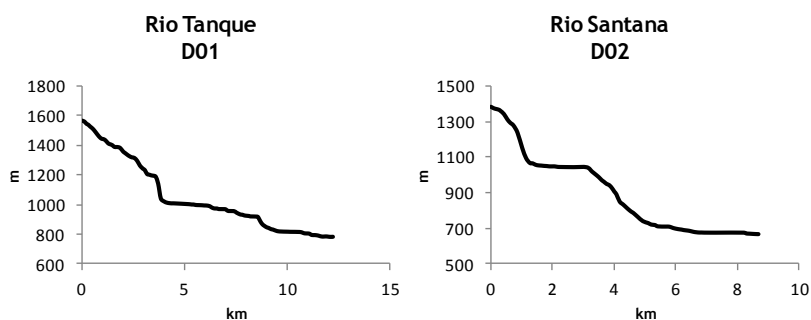


Figura 4. Perfis longitudinais dos cursos d'água amostrados na Serra do Cipó

Os dados obtidos no Planalto Diamantina (Fig.5) evidenciam que as bacias J02, J04, J05 e J06 apresentam denudação química anual superior aos seus pares. Por outro lado, a sub-bacia J01 (0,7 ton/km²/ano) apresenta valor menor em relação à SF10 (1,1 ton/km²/ano),

uma diferença pequena, considerando o cenário geral para as bacias da porção norte da SdEM. A taxa média de denudação das sub-bacias do rio Jequitinhonha é de 1,40 ton/km²/ano, mostrando-se superior à média das sub-bacias do rio São Francisco, de 0,74 ton/km²/ano.

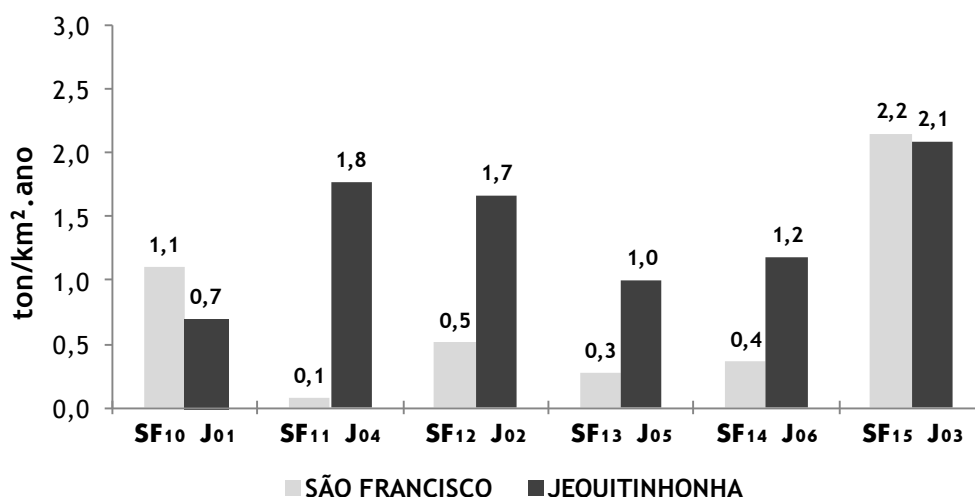


Figura 5. Variação da Denudação Química Anual dos pontos amostrados na bacia do rio Jequitinhonha e do rio São Francisco

A presença de bacias de maior área no Planalto Diamantina possibilitou avaliar a influência das unidades litológicas na análise comparativa das taxas denudacionais em relação às de menor área, que, por sua vez, são predominantemente quartzíticas. Dentre elas, a sub-bacia J03 (911,7 km²) do rio Jequitinhonha e a SF15 (733,9km²) do rio Pardo Grande destacam-se com maior área e apresentam variação de litotipos em relação às demais (como apresentado na Tabela 1). Trata-se das unidades litológicas simplificadas de quartzitos, quartzo-xistos, filitos e metabásicas. Contudo, ao se comparar o parâmetro área com os resultados de denudação química, constatou-se que não há relação entre a área da bacia e as taxas de denudação. A variação de litotipos das sub-bacias J03 e SF15 também não apresentou diferença significativa nos resultados de denudação, mostrando que prevalece a resistência dos quartzitos das formações do Supergrupo Espinhaço, no Planalto Diamantina, frente ao processo de intemperismo e erosão.

Já nos perfis dos cursos d'água, observou-se mais anomalias no gradiente longitudinal das sub-bacias do rio Jequitinhonha e maiores taxas de denudação (J02, J05 e J06), em relação aos cursos das sub-bacias do rio São Francisco. O desnível topográfico dos cursos d'água nas sub-bacias do São Francisco é de cerca de 300 m, enquanto o desnível nas sub-bacias do rio Jequitinhonha atinge 450 m. Uma diferença de 150 m, análoga à encontrada na Serra do Cipó entre as sub-bacias dos rios São Francisco e Doce.

A maior capacidade erosiva encontrada na bacia do Jequitinhonha em função de um maior desnível é conhecida e também foi verificada por Salgado *et al* (2004) no Quadrilátero Ferrífero que identificou potencial erosivo mais agressivo em bacias com maior desnível topográfico e mais elevadas em relação a seu nível de base. Considerações semelhantes foram traçadas pelos principais estudos acerca de processos de denudação em bacias hidrográficas (Stallard *et al.*, 1991; Milliman & Syvitski, 1992; Anderson *et al.*, 1993; Howard *et al.*, 1994 e Edmond *et al.*, 1995).

No Planalto Diamantina, as sub-bacias do rio Jequitinhonha destacam-se com maior denudação, contudo, se comparadas às sub-bacias do rio Doce (média de 5,71 ton/km²/ano), mostram valores inferiores de denudação, com média de 1,40 ton/km²/ano.

Taxa de rebaixamento químico

Na figura 6 apresenta-se a síntese dos resultados de rebaixamento químico para a Serra do Espinhaço Meridional: na seção A, tem-se a relação dos pares de sub-bacias da porção sul (Serra do Cipó), na seção B, as sub-bacias da porção média (Serra Talhada) e; na seção C, as sub-bacias da porção norte (Planalto Diamantina). Os dados apresentados configuram o seguinte cenário: (i) menores taxas de rebaixamento químico nas sub-bacias do rio São Francisco (médias de 1,43 m/Ma nas serras do Cipó e Talhada; e 0,28 m/Ma, no Planalto Diamantina), tendo seus dados concentrados na base do gráfico; (ii) taxas

medianas nas sub-bacias do rio Jequitinhonha (0,52 m/Ma); (iii) taxas maiores nas sub-bacias do rio Doce (2,13 m/Ma).

Na Serra do Cipó (seção A) como já mostrado, a denudação dos pontos da bacia do rio Doce são, em geral, superiores às da bacia do São Francisco. Nesse sentido, a análise do rebaixamento do relevo mostra a superioridade das taxas das sub-bacias da borda leste, com média de 2,13 m/Ma; em relação às sub-bacias da borda oeste, com média de 1,43 m/Ma. Mesmo superior, a taxa média de rebaixamento do compartimento leste é baixa, o que comprova a resistência dos quartzitos frente aos processos de intemperismo. Esses resultados corroboram com os dados apresentados por Salgado (2003; 2004) ao constatar taxa de

rebaixamento químico, para os quartzitos do Supergrupo Espinhaço de 2,43 m/Ma (Bacia do ribeirão Areia) e para os quartzitos do Grupo Caraça (Bacia do Caraça), no Quadrilátero Ferrífero, valores entre 1,30 e 5,90 m/Ma.

Na seção C, a taxa de rebaixamento do Planalto Diamantina demonstra a tendência de maior taxa de denudação na bacia do Jequitinhonha. Logo, este resultado reforça a consideração de que a vertente leste do Espinhaço possui taxas denudacionais mais agressivas que a vertente oeste, pois na região da Serra do Cipó as bacias, que vertem para o Doce, também apresentaram maiores taxas do que aquelas pertencentes à bacia do São Francisco.

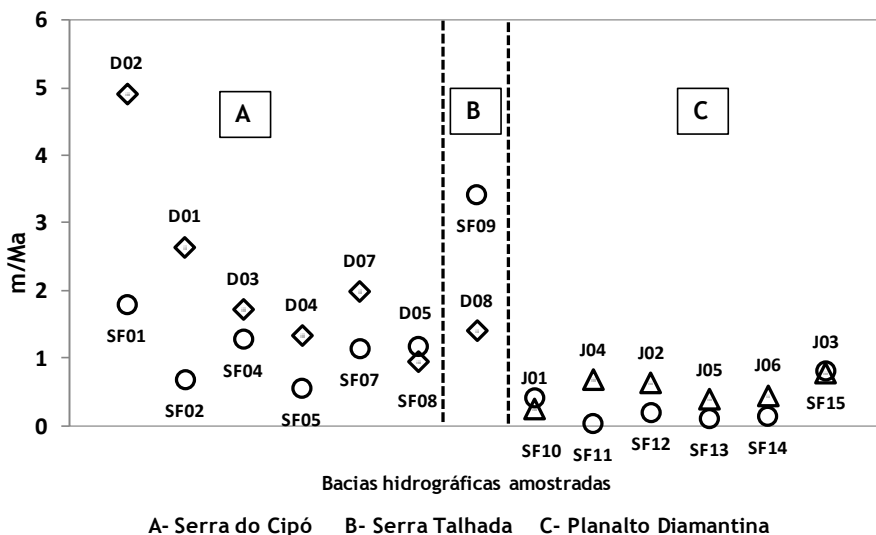


Figura 6. Taxa de Rebaixamento Químico na Serra do Espinhaço Meridional

A partir desses resultados, observou-se um processo de denudação diferencial entre as bordas leste e oeste da Serra do Espinhaço Meridional como mostrado nas seções A e C da figura 6. Na seção B, como analisado anteriormente, trata-se de duas bacias que tem quartzitos e granitos-gnaisses como substrato litológico, e, portanto, diferem-se do comportamento denudacional observado no contexto geral da serra.

Observa-se ainda que os valores encontrados no Planalto Diamantina são os menores da SdEM. Tal comportamento erosivo diferencial entre norte e sul, pode ser explicado pela maior área ocupada pelas terras altas da SdEM no Planalto de Diamantina. Ao sul, a SdEM é muito estreita, isso faz com que os cursos

fluviais drenem pouca área de planalto e maior área de escarpa. O contrário ocorre ao norte. Consequentemente, os cursos fluviais do sul possuem mais energia e maior poder erosivo que os do norte. Entretanto, os pares conjugados de bacias, tanto ao norte quanto ao sul, revelaram uma denudação química mais acentuada no lado leste da SdEM. Outro aspecto importante relacionado à diferença constatada na porção sul da SdEM é a tectônica quaternária distensiva do médio vale do rio Doce, fator que também pode estar interferindo na intensidade das taxas de denudação na bacia.

Finalmente, no cenário geral da SdEM as taxas de rebaixamento apresentaram-se muito baixas, evidenciando uma evolução mais lenta da paisagem, em virtude, sobretudo, do

contexto litológico no qual se insere. Isso pode ser observado nas três porções do compartimento, porém, constatou-se um avanço diferenciado da bacia do rio Doce (2,13 m/Ma) em relação à bacia do rio Jequitinhonha (0,52

m/Ma) na borda leste, o que pode ser explicado pelo maior desnível topográfico nos cursos d'água das sub-bacias da porção sul (850m) se comparadas às da porção norte (450m).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho evidencia que a resistência litológica dos quartzitos frente às demais rochas constituintes do Espinhaço Meridional se faz presente nas sub-bacias, conferindo menores taxas de denudação química. Há que se ressaltar também a presença das maiores taxas denudacionais nas sub-bacias do rio Doce, devido ao maior desnível altimétrico e ao contexto tectônico da bacia. Observou-se ainda que a intensidade das taxas de denudação química nas sub-bacias da Serra Talhada, com substrato de quartzitos e granito-gnaisses assemelha-se às demais sub-bacias em contexto quartzítico. Isso reforça o controle

litológico dos quartzitos do Supergrupo Espinhaço frente às demais litologias presentes na área investigada.

Os valores mais elevados de denudação química nas sub-bacias do rio Doce e Jequitinhonha evidenciam processo denudacional diferenciado a leste. Sendo assim, para as áreas quartzíticas da SdEM, os resultados obtidos neste trabalho corroboram com a interpretação geomorfológica de Saadi (1995), pois reconhecem comportamento erosivo mais agressivo das bacias atlânticas em relação às bacias interioranas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ pelo apoio financeiro através do Projeto 561715/2008-4 e pela bolsa de doutorado. À FAPEMIG pelo financiamento através do Projeto APQ-00507-08. A Marina Ribeiro Leão e Éric Andrade Rezende, pelo apoio nas coletas de água, e Adriana Trópia, do Laboratório de Geoquímica Ambiental do DEGEO/UFOP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBARÈDE, F. Geoquímica uma introdução. São Paulo: Oficina de Textos. p.167-192. 2011.
2. ALMEIDA-ABREU, P. A. & RINGER, F. E. A Serra do Espinhaço Meridional: um orógeno de colisão do Mesoproterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, 32(1): p.1-14, 2002.
3. ALMEIDA-ABREU, P. A. **Serra do Espinhaço Meridional: Paisagens e Ambientes**. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Belo Horizonte: O Lutador. 2005.
4. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SINRH): Dados pluviométricos de Diamantina e Santana do Riacho**. Brasília: 2001. Disponível em: <<http://portalsnirh.ana.gov.br>> Acesso em: 27 jul. 2012.
5. ANDERSON, L.P., DIETRICH, W.E., TORRES, R., MONTGOMERY, D.R., LOAGUE, K. A case of geochemical control of concentration-discharge relationships. **Chemical Geology**. 107. p.369-371, 1993.
6. BARON, J. & BRICKER, O.P. Hydrologic and chemical flux in Loch Vale watershed, Rocky Mountain National Park. In: AVERETT, R.C. & MCKNIGHT, D.M. (eds), **Chemical quality of water and the hydrologic cycle**. Michigan, WI: Lewis Publishers, 141-155. 1987.
7. BIZZI, L.A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R.M., GONÇALVES, J.H. (eds.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. CPRM, Brasília. 21 p., 2003.
8. BURBANK, D.W. & ANDERSON, R.S. **Establishing Timing in the landscape: dating methods**. In Tectonic Geomorphology. Capítulo 3 – p. 33-52, 2001.

9. CAINE, N. Geomorphic systems of Green Lakes Valley. In: BOWMAN, W.D. & SEASTEDDT, T.R. (eds). **Structure and function of alpine ecosystem**. New York: Oxford University Press., 45-74. 2001.
10. CAINE, N. Mechanical and chemical denudation in mountain systems. In: OWENS, P.N. & SLAYMAKER, O. (eds). **Mountain Geomorphology**. Arnold Publishers. p. 132-152. 2004.
11. CAINE, N. & THURMAN, E.M. Temporal and spatial variations in the solute content of alpine stream, Colorado Front Range. **Geomorphology**, 4:55-72. 1990.
12. CARMO, M. S.; BOAVENTURA, G. R.; OLIVEIRA, E. C. Geoquímica das águas da bacia hidrográfica do rio Descoberto, Brasília/DF – Brasil. **Química Nova**, 28 (4): 565–574. 2005.
13. CARSON, M.A. & KIRKBY, M.J.. **Hillslope form and process**. Cambridge, University Press, 475p, 1972.
14. DREVER, J. I.; CLOW, D. W. Weathering rates in catchments. In: WHITE, A. F.; BRANTLEY, S. L. (ed.). Chemical weathering rates of silicate minerals. 1st ed. **Reviews in Mineralogy**, 31: 463–483. 1995.
15. EDMOND, J.M., PALMER, M.R., MEASURES, C.I., GRANT, B., STALLARD, R.F. The fluvial geochemistry and denudation rate of the Guayana Shield, in Venezuela, Colombia and Brazil. **Geochimica et Cosmochimica Acta**.v.59, n.16, p.3.301-3.325, 1995.
16. FABRI, F. P.; CALUX, A. S.; CASSIMIRO, R. Estudo das Cavernas quartzíticas em Itambé do Mato Dentro, Minas Gerais. In: **Conexão Subterrânea - Boletim Redespeleo**, v. 79, p. 2, 2010.
17. FOGAÇA, A. C. C. & SCHÖLL, W. V.. Estratigrafia e tectônica das rochas arqueanas e proterozóicas da região de Guinda e Gouveia (MG). In: **Anais 33º Congr. Bras. Geologia, Soc. Bras. Geologia**, Rio de Janeiro, p. 2638-2653, 1984.
18. 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. p.1598. 1997.
19. GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; Soares-Filho, B. S. (coordenadores e editores). In: **Projeto Espinhaço em CD-ROM (textos, mapas e anexos)**. Belo Horizonte: COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. 1997.
20. HOVIUS, N.. Controls on sediment supply by large rivers, in Shanley, K. W., and McCabe, P. J., editors, **Relative role of eustasy, climate, and tectonism in continental rocks**: Society for Sedimentary Geology Special Publication, v. 59, p. 3-16, 1998.
21. HOWARD, A.D., DIETRICH, W.E., SEIDL, M.A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. **Journal of Geophysical Research**. v. 99, n. B7, p. 13.971-13.986, 1994.
22. INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Cadastro de Áreas Protegidas do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: 2005. Disponível em: <www.ief.gov.br>. Acesso em: 10 jul. 2012.
23. MAST, M.A.; DREVER, J.I; BARON, J. Chemical weathering in the Loch Vale watershed, Rocky Mountain National Park, Colorado. **Water Resources Research**, 26: 2971-2978. 1990.
24. MELLO, C.L., METELO, C.M.S., SUGUIO, K., KHOLER, H.C.. Quaternary sedimentation, neotectonics and evolution of Doce River middle valley lake system (Southeastern Brazil). **Revista do Instituto Geológico**, 20 (1/2), 29-36. 1999.
25. MILLIMAN, J.D. & SYVITSKI, J.P.M.. Geomorphic/Tectonic Control of the Sediment Discharge of The Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. **The Journal of Geology**. Chicago. v.100, p. 525-544, 1992.
26. MIRANDA, E.E.de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 10 jun.2009.
27. MORTATTI, J.; VICTORIA, R.L.; TARDY, Y.. Balanço de alteração e erosão química na bacia amazônica. **Geochimica Brasiliensis**. 11(1): 099-111. 1997.
28. MORTATTI, J.; PROBST, J-L.; BORTOLETTO JÚNIOR, M. J. Piracicaba

- river basin: mechanical and chemical erosions. **Geociências**, 22 (1): 75–81. 2003.
29. LEEDER, M. R.. Denudation, vertical crustal movements and sedimentary basin infill. **Geologische Rundschau**, 80(2): p.441-458, 1991.
30. OLIVEIRA, F. V. C. & ALKIMIM, F. F.. Estilo estrutural e curvatura da porção sul do front do Espinhaço. In: **38º Congresso Brasileiro de Geologia, Boletim de Resumos Expandidos**, Camboriú. Vol. 2, p. 259-260, 1994.
31. PINET, P. & SORIAU, M.. Continental Erosion and Large-Scale Relief. **Tectonics**. 7(3): p.563-582, 1988.
32. ROCHA, L.C. Desnudação Geoquímica na Evolução da Serra do Espinhaço Meridional – MG -Brasil. Tese. (Doutorado em Geografia) Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. 2011.
33. SAADI, A.. A geomorfologia da serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. **Geonomos**. 3 (1) : p. 41-63, 1995.
34. SALGADO, A.A.R & VALADÃO, R.C.. Contribuição da desnudação geoquímica na evolução da erosão diferencial na Serra do Espinhaço Meridional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 4, nº 2, p.31-40, 2003.
35. SALGADO A. A. R.; COLIN, F.; NALINI JR., H. A.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A.F.D.C.; VARAJÃO, C.A.C.. O Papel da Denudação Geoquímica no Processo de Erosão Diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 5 (1): p.55-69, 2004.
36. SCHAEFER, C.E. Diagnóstico do meio físico da APA Morro da Pedreira e da Serra do Cipó: subsídios ao plano de manejo. In: **Relatório do Levantamento Pedológico, Geológico e Geomorfológico**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 80p, 2008.
37. SCHOBENHAUS, C. & CAMPOS, D.A.. A evolução da Plataforma Sulamericana no Brasil e suas principais concentrações minerais. In: Schobbenhaus C. et al. Coords. **Geologia do Brasil**. Brasília, DNPM, p. 9-53. 1984.
38. SILVEIRA, C. S.; COELHO NETTO, A. L. Hydrogeochemical responses to rainfall inputs in a small rainforest basin: Rio de Janeiro, Brazil. **Phys. Chem. Earth (A)**, 24 (10): 871–879. 1999.
39. STALLARD, R. F. & EDMOND, J. M. Geochemistry of the Amazon 1: precipitation chemistry and the marine contribution to dissolved load at the time of peak discharge. **Journal of Geophysical Research**, 86: 9844-9858. 1981.
40. STALLARD, R. F. & EDMOND, J. M. Geochemistry of the Amazon 2: the influence of geology and weathering environment on the dissolved load. **Journal of Geophysical Research**, 88 (C14): 9671–9688. 1983.
41. STALLARD, R.F., KOEHNKEN, L., JOHNSON, M.J.. Weathering processes and the composition of inorganic transported through the Orinoco River system, Venezuela and Colombia. **Geoderma**. 51, p.133-165, 1991.
42. SUGUIO, K. & KHOLER, H.C.. Quaternary barred lake systems of Doce river (Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 64(2), 183-191. 1992.
43. SUMMERFIELD, M. A.. **Global Geomorphology: an introduction of the study of landforms**. Essex, Longman Scientific & Technical: 129-144, 163-203, 371-395, 457-478, 1991.
44. SUMMERFIELD, M. A.. Sub-aerial denudation of passive margins: regional elevation versus local relief models. **Earth and Planetary Science Letters**. 102, p. 460-469, 1991a.
45. SUMMERFIELD, M.A. & HULTON, N.J.. Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. **Journal of Geophysical Research**. 99.13.871-13.883, 1994.
46. TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press, 2nd Ed., Cambridge, 1990.
47. THOMAS, M. F.. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**. West Essex, John Wiley & Sons Ltd. 460p, 1994.
48. TUCCI, C.E.M.. **Hidrologia aplicada: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora UFRGS. p. 485-523, 2002.

*Manuscrito recebido em: 01 de junho de 2011
Revisado e Aceito em: 17 de outubro de 2012*