

ABORDAGEM GEOMORFOLÓGICA NA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO E PROCESSOS MORFOGENÉTICOS ASSOCIADOS: UM ESTUDO COMPARATIVO NA BACIA DO CÓRREGO SÃO TOMÉ

Roberto MARQUES NETO¹

Resumo

O presente trabalho estuda impactos geomorfológicos causados pela mineração através da abordagem sistêmica em Geomorfologia. Foram tomados para análise a extração de quartzito no município de São Thomé da Letras (MG) e os problemas ambientais associados, selecionando a bacia do Córrego São Tomé para uma abordagem comparativa aplicando três estratégias metodológicas: o estudo da fisiologia da paisagem; a análise da bacia como unidade processo-resposta e a abordagem ecodinâmica.

Palavras-chave: Mineração. Geomorfologia. Abordagem sistêmica. Bacia hidrográfica.

Abstract

Geomorphological approach in the environmental impacts appraisal mineration and morphogenetic process associates: a comparative study in the córrego São Tomé basin

The present work studies geomorphological impacts caused by the mining through the systemic approach in Geomorphology. Quartzite extraction in the city of Sao Thomé of Letras (MG) was taken for analysis and the environmental problems associates, selecting the Córrego Sao Tome basin for a comparative approach concern the application of three methodological strategies: the study of the landscape physiology; the analysis of the basin as unit process-reply and the application of the ecodynamical evaluation.

Key words: Mining. Geomorphology. System approach. Hydrographic basin.

¹ Doutorando em Geografia pela UNESP – Rio Claro, bolsista CAPES.

INTRODUÇÃO

Duas questões fundamentais balizam a problemática mais abrangente relativa à exploração dos recursos minerais, no que tange à alteração que induz nos sistemas naturais e na sociedade: o caráter não-renovável de tais recursos e as vultuosas contrapartidas ambientais e sociais passíveis de se instalarem com a prática exploratória.

Nesse sentido, Santos e Eustáquio Neto (2006) ressaltam o pensamento extremista de que a mineração sempre é necessariamente incompatível com a conservação ambiental e que apenas as grandes empresas têm o aporte financeiro necessário para a recuperação das áreas degradadas. Em confronto com tal pensamento, costuma ser evocada a importância econômica da mineração, com menções recorrentes à geração de empregos (em grande parte de baixa qualificação) e à necessidade de alguns minérios para a produção e crescimento econômico.

A mineração configura de fato uma das atividades econômicas mais importantes no que tange à poluição dos recursos hídricos em função dos efluentes de lavra liberados para os sistemas hídricos com os quais a área explorada se relaciona pelos fluxos superficiais. Também é capaz de provocar, conforme a modalidade de exploração, poluição sonora, quando, por exemplo, do desmonte de estruturas rochosas por intermédio de explosivos. É o caso da extração de rochas a céu-aberto, como gnaisses e granitos, quartzito, basalto, entre outras, comumente lavradas mediante o uso de altos explosivos como a dinamite, que, segundo Bacci (2000), possui velocidade média elevada e ação instantânea na estrutura litológica. Em alguns casos a mineração também interfere na composição da atmosfera, o que é levado a efeito pela força do arrasto eólico imposto às partículas de baixa ordem granulométrica derivadas da fragmentação da estrutura litológica, além de gases tóxicos liberados durante as detonações, como o monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO e NO₂).

Entre as alterações ambientais oriundas da atividade mineira tomam vulto os impactos de ordem geomorfológica, expressos por modificações quase sempre irreversíveis na paisagem associada à desorganização na intensidade e direção dos fluxos de massa e energia. As alterações no relevo e na drenagem podem ser profundas, exercendo efeitos sinérgicos em todo o conjunto da paisagem. Além disso, a exploração mineral também gera uma série de externalidades sociais que amalgama os sistemas ambientais com a esfera sócio-econômica (Figura 1) mediante encadeamento direto entre as ações transformadoras, os fatores ambientais afetados e o contexto social e econômico justificador do aproveitamento da matéria explorada, exercendo efeitos mútuos e recíprocos que sugerem uma discussão conjunta, mediante postura integrada capaz de ir além de uma simplificada abstração de causa e efeito.

Alimentada pela problemática exposta, o presente artigo enfoca o papel da geomorfologia na análise dos impactos engendrados pela mineração, apontando para a aplicabilidade do método sistêmico como condutor no estudo das alterações ambientais decorrentes da exploração de recursos minerais. Foi tomado como estudo de caso a depredatória extração de quartzito processada no município de São Thomé das Letras, localizado no setor meridional do estado de Minas Gerais (Figura 2), onde foi selecionada a bacia do córrego São Tomé como unidade de estudo e mapeamento.

A possibilidade de diferentes estratégias metodológicas a serem adotadas no âmbito da geomorfologia onde a abordagem sistêmica se inscreve de maneira cabal estimulou um estudo comparativo de três recursos metodológicos recorrentes na pesquisa geomorfológica: o estudo da fisiologia da paisagem (AB'SÁBER, 1969), a análise de bacias hidrográficas enquanto sistemas processo-resposta (CHORLEY; KENNEDY, 1971) e a aplicação do modelo ecodinâmico (TRICART, 1977), dando margem à discussão entre as potencialidades e limitações de cada método, os pontos conflitantes e convergentes entre os mesmos e seus valores no estudo de impactos ambientais da mineração.

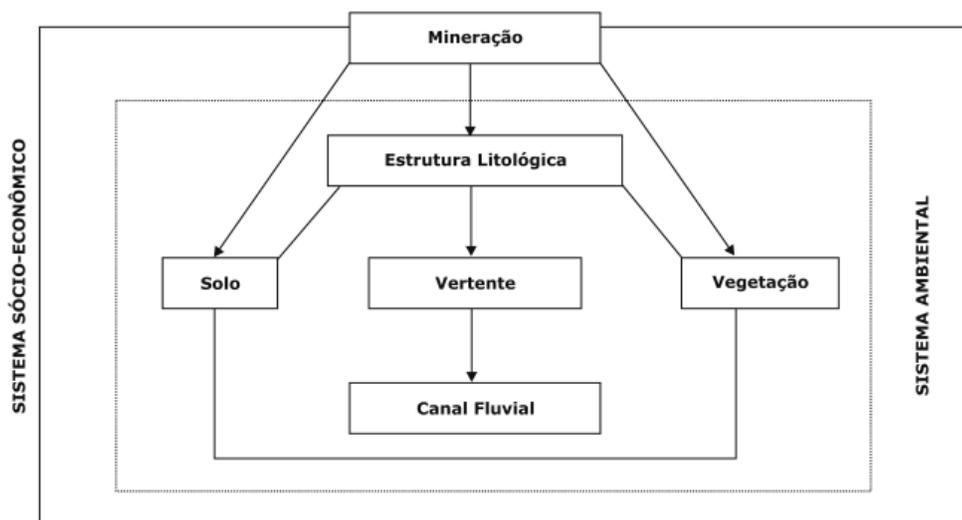


Figura 1 - A mineração em perspectiva sistêmica

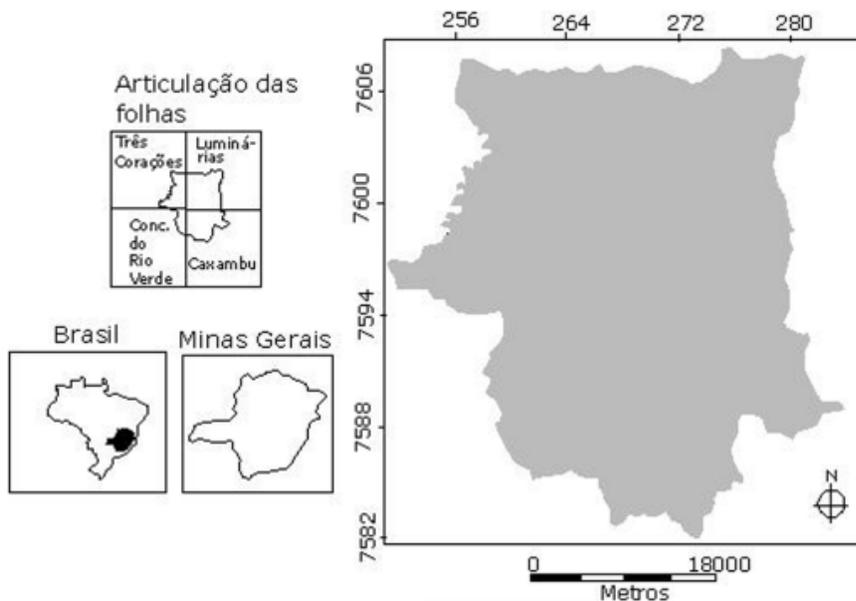


Figura 2 - Localização do município de São Thomé das Letras (MG)

CONTEXTUALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O município de São Thomé da Letras possui contingente populacional de 6204 habitantes, sendo que 3289 são homens e 2915 mulheres. A população urbana ultrapassa levemente a rural, com 3212 habitantes na cidade e 2992 no campo. A principal atividade econômica do município é a mineração, que emprega cerca de 70% da população economicamente ativa, aproximadamente, e responde por 50% do ICMS (IBGE, 2000). Em segundo plano, a atividade turística aparece como forma alternativa de renda aproveitando-se dos atrativos naturais e culturais existentes.

A atividade mineira, que se refere à extração de quartzito empregado na fabricação de lages ornamentais, explora em São Thomé das Letras variedades micáceas pertencentes à Bacia Andrelândia (PACCIULLO *et al.* 1993), redefinida a partir da proposição de Ebert (1971), cuja magnitude dos impactos e quadro de degradação ambiental são mais acentuados que em outros municípios exploradores no sul de Minas, como Conceição do Rio Verde e Luminárias.

Os quartzitos afloram em cristas monoclinais de orientação geral NE-SW com altitudes superiores a 1400 metros com desníveis superiores a 300 metros e os vales escavados em micaxistos pelos rios orientados pela faixa de cisalhamento. Tanto a oeste quanto a leste dessas serras desenvolveu-se um relevo de morros e morrotes padronizados em paragnaisses bandados de raro afloramento na área.

Originalmente, o mosaico fitogeográfico predominante da região era a mata latifoliada estacional semidecidual, vegetação típica dos terrenos elevados da fachada atlântica no Brasil Sudeste submetidos ao clima tropical de altitude. Nos dias atuais está restrita a fragmentos no Planalto do Alto Rio Grande, sendo que em São Thomé das Letras aparecem continuamente pelas vertentes das serras locais (serras de São Thomé e do Cantagalo) que se orientam para sudeste. Pelo lado oeste das serras, o quartzito comporta fisionomia de campo rupestre, altamente degradada nas áreas de mineração.

ABORDAGEM SISTÊMICA E PESQUISA GEOMORFOLÓGICA

A fisiologia da paisagem

Em sua concepção original, a interpretação da dinâmica do meio segundo a abordagem da fisiologia da paisagem (AB'SÁBER, 1969) está ancorada em três níveis de tratamento a serem percorridos durante a pesquisa geomorfológica.

O primeiro nível consiste na compartimentação do meio físico e na caracterização dos compartimentos discernidos. Em um segundo nível de abordagem, a pesquisa geomorfológica se esforça em obter informações sistemáticas acerca da estrutura superficial da paisagem, examinando as coberturas de alteração e os depósitos superficiais e as superfícies de erosão associadas para reconstruir aspectos da evolução paleoclimática do sistema geomorfológico em questão. O terceiro nível de tratamento levaria a apreensão efetiva da fisiologia da paisagem, considerando a exploração antrópica de maneira contundente e buscando a compreensão dos processos morfoclimáticos e pedogenéticos atuais mediante observações sistemáticas de elementos como temperatura, pluviosidade, regime hidrodinâmico e outros aspectos indicativos da dinâmica da paisagem ao longo do ano, atentando também para os eventos que diferem do padrão geral de evolução morfológica, como castigos climáticos expressos por índices pluviométricos anômalos que provocam descarnamento generalizado da tectura geocológica e geram trombas d'água que mobilizam torrentes de lama responsáveis por significativas alterações na morfologia fluvial.

A presente pesquisa enfoca os dois primeiros níveis de tratamento, se restringindo a fazer algumas ponderações situadas no terceiro nível, conforme a disponibilidade de dados, reconhecidamente o de mais difícil aplicação, conforme esclarece Ab'Sáber (1969, p. 2):

"Há que entender a fisiologia da paisagem apoiado, pelo menos, nos seguintes conhecimentos: a sucessão habitual do tempo, a atuação de fatos climáticos não-habituais, a ocorrência de episódios espasmódicos, a hidrodinâmica global da área, e, ainda, levando-se em conta os processos biogênicos, químicos, interrelacionados".

O método apresentado por Aziz N. Ab'Sáber, entretanto, não perde validade ao ser compreendido e aplicado segundo ênfase dada aos dois primeiros níveis de abordagem, limitando o terceiro nível às informações existentes. O autor (AB'SÁBER, 1969, p. 3) valida tal postura ponderando que:

"Desde que se faça ao mesmo tempo o estudo da compartimentação e das formas e o estudo da posição dos diferentes tipos de depósitos superficiais – e, considerações adequadas sobre sua significação paleogeográfica – todos os pesquisadores ficam concordes, quanto ao valor metodológico do procedimento. Em outras palavras, desde que se lhes demonstre que o realmente pretendido é um estudo da compartimentação da paisagem, acompanhado *pari passu* por uma prospecção superficial dos diferentes depósitos de vertentes, terraços e planícies, todos ficam plenamente de acordo sobre a validade do método".

A bacia hidrográfica como sistema processo-resposta

Esta orientação metodológica se baseia na classificação proposta por Chorley e Kennedy (1971), que distingue cerca de onze tipos de sistemas, quatro deles, conforme destaca Christofoletti (1999), são os mais relevantes para o campo de atuação da Geografia Física e dos estudos ambientais em geral, os quais serão aqui levados em conta (Figura 3).

- (a) sistemas morfológicos: são compostos pela associação entre as propriedades físicas dos sistemas e seus atributos constituintes. São os sistemas menos complexos das estruturas naturais, expressando essencialmente sua morfologia;
- (b) sistemas em seqüência ou encadeantes: são formados por subsistemas em cadeia que se conectam numa relação de cascata de matéria e energia, onde o *output* de um sistema é tomado como *input* pelo subsistema da seqüência;
- (c) sistemas de processos-respostas: são formados através da conjugação dos dois sistemas anteriores, na qual os sistemas em seqüência são representativos dos processos e os morfológicos das respostas. Tal raciocínio implica que alterações nos fluxos de matéria e energia exerçam reflexos na estrutura e dinâmica do sistema morfológico, cujo *feedback* se daria através de uma reorientação da evolução morfológica conforme a alteração na natureza dos processos;
- (d) sistemas controlados: representativos da ação antropogênica alterando os fluxos de matéria e energia e interferindo na organização erosiva e na morfologia do sistema.

Nessa estruturação, é necessário distinguir os diversos subsistemas operantes, que, no âmbito de uma bacia de drenagem, são representados, essencialmente, pela vegetação, vertente, zona de aeração, zona freática e canal fluvial. Também devem ser estabelecidos os *reguladores*, instrumentos responsáveis pelas funções decisórias do sistema no que tange à orientação dos fluxos de matéria e energia, e os *armazenadores*, cuja função é

armazenar, por lapso de tempo variável, a quantidade de massa e energia que ficou retida no subsistema até que estas se convertam em *output* (CHRISTOFOLETTI, 1999).

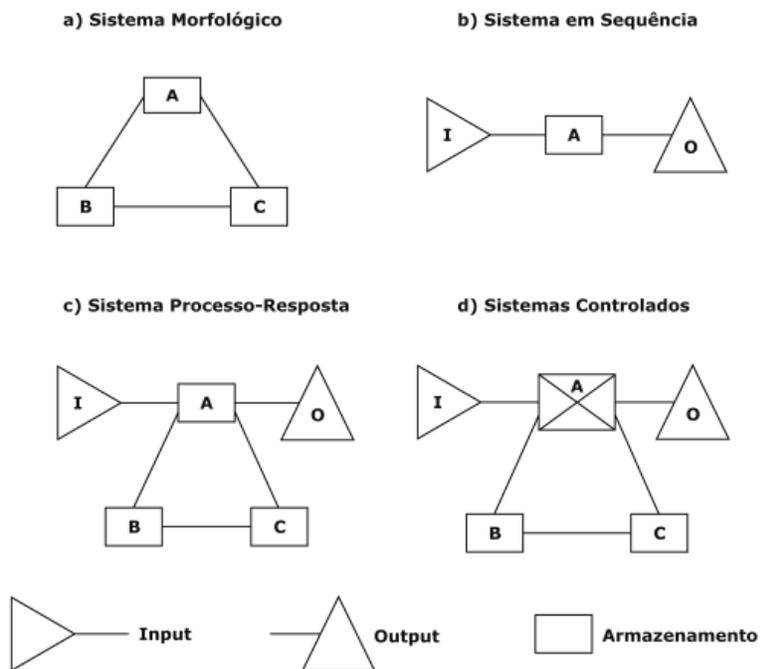


Figura 3 - Tipologia de sistemas segundo Chorley e Kennedy (1971)

A abordagem ecodinâmica

A abordagem ecodinâmica proposta por Tricart (1977) representa valiosa possibilidade de aplicação do método sistêmico para o estudo da dinâmica das paisagens físicas, haja vista a orientação múltipla dada a vasto plantel de trabalhos em geomorfologia aplicada.

O estudo da dinâmica das paisagens proposto por Tricart (1977) concebe três unidades ecodinâmicas distintas assim designadas: (a) *meios estáveis*, onde os processos pedogenéticos suplantam os processos mecânicos na evolução do modelado; (b) *meios intergrades*, ou meios de transição, onde morfogênese e pedogênese atuam equalizadas na dinâmica da paisagem; (c) *meios fortemente instáveis*, caracterizados pelo predomínio dos processos morfogenéticos frente aos pedogenéticos, seja por fatores de ordem natural, seja por causas antrópicas.

Os resultados obtidos por meio da abordagem ecodinâmica são representados na chamada carta ecodinâmica, documento cartográfico síntese representativo da dinâmica do meio ambiente que emite informações de base sobre a dinâmica dos ecossistemas (TRICART, 1978).

O aproveitamento da flexibilidade inerente a este recurso metodológico determinou que várias adaptações fossem feitas a partir de sua essência para fins de apreensão sobre a fragilidade ambiental em diferentes áreas. A proposta apresentada está pautada, em linhas gerais, nos procedimentos executados por Ross (1994) com algumas adaptações, tendo sido

arbitrado valores numéricos (1 a 5) para atributos do meio físico e uso atual, iniciando-se pelo uso do solo e cobertura vegetal segundo a capacidade de interceptação das águas pluviais, sucedido pela valoração dos solos (segundo sua susceptibilidade à erosão), do relevo (conforme a declividade), densidade de drenagem e litologia. Os valores foram arbitrados de acordo com a significância morfogenética da variável, sendo que, quanto maior o valor atribuído, maior o seu potencial geomórfico. Os atributos uso do solo e cobertura vegetal e solos foram valorados com base nas orientações de Bertoni & Lombardi Neto (2005). Posteriormente os valores foram associados através da soma para extração dos intervalos numéricos correspondentes às unidades morfodinâmicas obtidas.

Os documentos cartográficos necessários para a obtenção das unidades morfodinâmicas foram apresentados em outras oportunidades (MARQUES NETO; LADEIRA, 2004), (MARQUES NETO, 2005), bem como a carta-síntese final (MARQUES NETO; VIADANA, 2005).

A BACIA HIDROGRÁFICA EM TRÊS NÍVEIS DE TRATAMENTO

A compartimentação proposta para a bacia do córrego São Tomé como primeiro nível de abordagem teve como base cartográfica as folhas topográficas de escala 1:50000 SF-23-X-C-IV-1 (Luminárias) e SF-23-I-C-IV-2 (Três Corações), e imagens compatíveis de satélite CBERS/CCD.

Os compartimentos discernidos em unidades de mapeamento, e que compõem a área de estudo em sua totalidade, são caracterizados de forma integrada a seguir, com considerações sobre a morfologia, cobertura superficial e morfogênese prevalente. A representação cartográfica é apresentada na figura 4.

Compartimentos erosivos (modelados de dissecção)

A) Crista monoclinial (Dc)

Subcompartimento I: Topos planos a suavemente inclinados (DcI)

Subcompartimento II: Reverso dissecado (DcII)

B) Morros e morrotes rebaixados de vertentes convexas a retilíneas e topos convexas a aplainados (Dm)

Compartimento acumulativo (modelado de agradação)

A) Planície colúvio-aluvionar dissecada (ApcA)

CARACTERIZAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS

Os compartimentos mais elevados da bacia são os topos das cristas monocliniais, cimeiras locais que testemunham antiga paleosuperfície posicionada na alta bacia do córrego São Tomé, no reverso suavemente inclinado da serra homônima, em sentido concordante ao mergulho das camadas metassedimentares, em altitudes superiores a 1300 metros. A faixa serrana é balizada pelos quartzitos micáceos da Bacia Andrelândia (ALMEIDA, 1992), (PACCIULO

et al. 1993), (FERNANDES, 2002), que se apresenta disposto segundo estratificação plano-paralela em suaves mergulhos rumo NW sinalizando o ambiente deposicional costeiro de origem na margem passiva do cráton do São Francisco em seu setor meridional. Os arenitos de margem passiva foram acometidos por três fases de dobramentos neoproterozóicos (TROUW et al. 1980; 1984) (Ciclo Brasileiro) vinculadas à justaposição do megacontinente Gondwana.

Os setores mais elevados das faixas quartzíticas costumam não apresentar nenhum volume pedológico. Medra nesse ambiente litólico uma fisionomia rupestre composta por árvores esparsas que dividem o espaço com formações arbustivas, tufo de gramíneas e cactáceas. Benitez et al. (2003) destacam as relações estreitas entre estas formações vegetais e o ambiente litólico e os solos rasos e ácidos formados no quartzito, utilizando o termo *complexos rupestres de altitude*, aqui diferenciado os complexos em quartzito dos complexos em gnaíse e granito que aparecem na Serra da Mantiqueira e outros compartimentos embasados por essa litologia.

As zonas de topo guardam resquícios de superfície de erosão mais antiga na área que provavelmente remonta ao Terciário Inferior, e pode ser relacionada à Superfície Sul-Americana (KING, 1956), e que se materializa no Planalto do Alto Rio Grande na cumeada dessas cristas alçadas em altitudes superiores à das cristas médias. Sua preservação se deve a alta resistência do quartzito ao ataque químico e à dinâmica epirogenética associada à diversidade tectono-estrutural da região, responsável por nítido soergimento preferencial desse bloco integrante da extremidade norte de importante cinturão de cisalhamento regional, bruscamente interrompido para dar lugar a uma paisagem mais rebaixada em conjuntos de serras residuais e morros que dão passagem ao rio Ingaí no município de Luminárias (MG).

A cobertura pedológica escassa ou ausente das cristas quartzíticas aliada à presença de uma vegetação aberta repercute num baixo índice de infiltração e forte escoamento superficial. Em condições naturais, os fluxos superficiais adentrariam o compartimento disposto subsequentemente à jusante, após o contato litológico com os gnaíses com eficiência e rapidez. Precipitações anômalas podem condicionar a formação de trombas d'água provenientes de montante com alterações bruscas no regime hidrodinâmico, conforme foi registrado para os dias 25 e 26 de novembro de 2006, onde, num período inferior a doze horas foram precipitados na região 174 mm segundo dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) publicados na home page oficial de "O Estado de Minas" no dia 28 do mesmo mês do ano de 2006 (www.estaminas.com.br), o que foi responsável por aumento nas descargas e transbordamento de vários canais fluviais. Os reflexos na vazão se referem a mudanças igualmente bruscas, capaz de erodir apreciavelmente trechos das margens ou retirar, com atrito contínuo e insistente, um banco de areia inteiro ou ainda transportar fragmentos de maior tamanho que dependem de descargas consideráveis para serem colocados em movimento no leito do rio.

A mineração vem a ser, sem sobra de dúvida, a principal ação por alterar a fisiologia da paisagem. A dinâmica dos fluxos de massa e energia encontra-se drasticamente desestruturada no compartimento em tela em função da extração maciça e constrangedoramente depredatória de quartzito, que modifica severamente a paisagem em suas formas e processos operantes, ocasionando intermitência para alguns cursos d'água naturalmente perenes e que são reativados na época das chuvas e reorientando os fluxos hídricos nas vertentes.

O fim do alto curso do córrego São Thomé coincide com a extensão longitudinal do compartimento das cristas, que termina em falhamento bem marcado com formação de encachoeiramento no espelho de falha, sinalizando a passagem do Subcompartimento DcII para o Compartimento Dm, definida por contato litológico entre os quartzitos e plagiognaíses, a partir de onde é assinalada significativa mudança no relevo e em todo o conjunto da paisagem, evoluída mediante maior intensidade de intemperismo químico nessas rochas, cuja propriedade de alteração sob processo de esfoliação esferoidal resulta em relevo ondulado

com mantos de saprolito e solos mais desenvolvidos revestindo estes modelados de dissecação representativos de superfícies mais recentes de idade plio-pleistocênica.

As altitudes médias desse compartimento são da ordem de 1000 metros, e o manto de alteração assume profundidades superiores a 2 metros. Os Neossolos Litólicos e Cambissolos Háplicos aparecem em setores mais íngremes e em vertentes curtas, sustentando resquícios de cerrado e pastos nativos. Em vertentes mais extensas com declives moderados a pedogênese latossólica é mais potente. Destacam-se Latossolos Vermelho Amarelos relativamente profundos ocupados predominantemente por pastagens com algumas manchas de mata latifoliada estacional semidecidual; fragmentos de cerrado aparecem vinculado a solos com horizonte B textural ou mais rasos.

A morfogênese predominante é expressa pela erosão laminar, e se distribui com intensidade diferencial pelas encostas, alternando setores de relativa estabilidade com vertentes mais erodidas e instáveis.

O Compartimento Apca constitui superfície geomrfológica predominantemente de acumulação sedimentar, servindo como sítio preferencial de deposição de material proveniente de montante via canal fluvial e do transporte processado nas vertentes adjacentes. Concomitantemente ocorrem efeitos erosivos por conta da dissecação promovida por pequenos cursos d'água que tributam o córrego São Tomé em seu baixo curso.

Na desembocadura do córrego São Tomé no nível de base local (rio do Peixe), verifica-se a ocorrência de uma baioneta representada por *shutter-ridge* bem marcada por uma falha transcorrente, revelando, juntamente com outros indicadores morfológicos (terraços rochosos, migração lateral da drenagem principal em relação ao eixo da bacia), efeitos tectônicos recentes partilhando da evolução morfológica, bem como o papel da morfotectônica na estruturação superficial da paisagem, à medida que exerce influência marcante na drenagem em sua morfologia e dinâmica erosiva e deposicional.

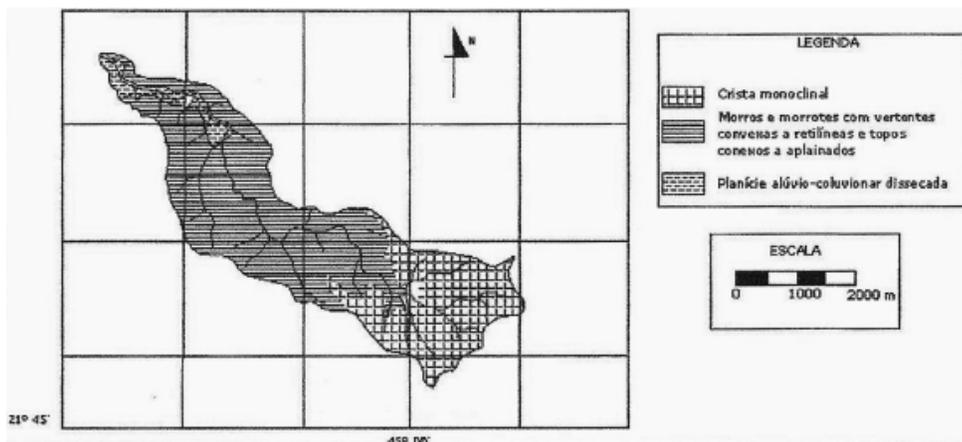


Figura 4 - Compartimentação topográfica da bacia do córrego São Tomé

PROCESSOS X FORMAS

A análise de bacias hidrográficas, à luz da proposta de Chorley e Kennedy (1971), favorece uma apreensão satisfatória da natureza dos fluxos de matéria e energia e dos ajustes internos que se refletem no modelado, exibindo assim resultados que se integram ao método anteriormente apresentado.

A bacia do Córrego São Tomé configura exemplo de forte controle antrópico no sistema, que suporta uma alteração drástica nos fluxos de matéria e energia por conta da intensiva e depredatória extração de quartzito a céu-aberto.

O processo de extração ocorre na alta bacia, no compartimento das cristas, onde os quartzitos afloram de maneira extensiva. Neste setor, as formas originais do relevo foram ostensivamente desconfiguradas e substituídas por taludes íngremes e grandes crateras abertas pelas explosões diárias, além das numerosas e imensas pilhas de estéril que sepultam a vegetação de cerrado existente no local e colocam material em movimento, delineando-se formas e processos eminentemente antropogenéticos para a área.

O rejeito de mineração, cuja ordem granulométrica varia de grandes blocos até areias quartzosas desprendidas nas explosões encontra-se disposto nas áreas de lavra em quantidades elevadas e altera profundamente os fluxos naturais de matéria e energia em natureza, intensidade e direção. Fernandes (2002) assinala que a repetição centimétrica a métrica dos fraturamentos é responsável pela geração de quantidade enorme de cacos inaproveitáveis que se acumulam na paisagem na condição de cobertura superficial.

O rejeito da mineração se desloca permanentemente pelas vertentes coletoras e atinge inexoravelmente os canais fluviais, entre eles o córrego São Tomé e alguns importantes formadores. O resultado mais direto é o entulhamento excessivo do talvegue, o que vem comprometendo seriamente a vazão dos pequenos ribeirões que dissecam a área. Grandes bancos de areia e seixos se depositam no canal principal, compondo uma carga de sedimentos que, embora granodécrescente de montante para jusante, é registrada em praticamente toda a extensão do canal.

Diante do contínuo processo de entulhamento, a drenagem assume um padrão anastomosado e um fluxo divagante, no qual o caudal escoia pelos trechos menos obstruídos pelo material estéril depositado. No mesmo sentido, os desvios de fluxo acentuam a erosão lateral e os talvegues tomam forma alargada. Christofoletti (1981) enfatiza que as formas dos leitos fluviais mais largas do que profundas são apropriadas para o transporte de material de grande tamanho e mal selecionado. É nesse sentido que a drenagem exerce erosão marginal na busca de seu perfil de equilíbrio, num nítido reajuste das formas em resposta à alteração na entrada de matéria e energia. À medida que a carga residual fornecida pela mineração em seu material estéril atinge proporções inadmissíveis na ocupação da superfície e excede a competência de transporte da drenagem, torna-se desproporcional o armazenamento de matéria no sistema com sua conversão natural em output pelo exutório da bacia de drenagem.

Os trechos mais entulhados, com presença maciça de blocos de grande tamanho, dão margem à formação de barragens que geram pequenas depressões formadas pelos sedimentos depositados nas margens à jusante do barramento, além de espriados à montante, onde a barragem funcional força a deposição do material transportado. Em conformidade com Fernandez (2004), as depressões ficam assoreadas com o tempo até se transformarem em soleiras. À jusante das depressões, o talvegue fica pavimentado em seixos irregularmente transportados.

Os impactos da mineração também interferem diretamente na biota pelo desmatamento para disposição dos bota-foras ou sepultamento da vegetação com a acomodação do rejeito nas encostas. A modificação nos padrões geométricos dos canais fluviais em função do aumento da erosão lateral vem expondo raízes e degradando progressivamente as matas

ciliares, provocando tombamento de espécimes pelo desprendimento das margens. Os troncos tombados também se convertem em barragens funcionais retentoras de sedimentos a exercerem interferência na erosão fluvial. De maneira sinérgica, processos físicos e ecológicos ocorrem em resposta à exploração mineral e a consequente contribuição engendrada no sistema.

Para o sistema em consideração, não ocorre o processo de realimentação negativa prevista por Chorley (1975), no qual a alteração nos *inputs* é compensada por modificações estruturais que regularizam os efeitos provocados e agem no sentido de alcançar um novo equilíbrio (*steady state*). O que se observa efetivamente é uma dinâmica que tende para um aprofundamento dos impactos, dada a natureza contínua, incansável e severa do controle antrópico que gera alterações de alta magnitude e faz por reduzir vertiginosamente a resiliência do sistema e reorientar sua morfogênese.

A modificação na dinâmica erosiva do canal principal vem catalisando uma reorganização erosiva dos afluentes mais próximos da área de extração que tende a conduzir paulatinamente a um rebaixamento da paisagem pelo alargamento progressivo dos vales. A tendência para o nivelamento advém da dificuldade de transporte de material: expressamente, a alteração na cascata de matéria e energia em limites que excedem a capacidade de transporte e retroalimentação do sistema hidrográfico vem determinando uma modificação no regime morfogenético original, incompatível com o uso atual do solo na bacia. Em resumo, a evolução morfológica tende a encontrar outros caminhos por meio de uma outra morfogênese.

O sistema em apreço também sofre interferência de outras modalidades de exploração antrópica, notadamente as atividades agropecuárias e algumas pequenas roças, porém seus efeitos nos fluxos de matéria e energia se manifestam em magnitude expressivamente menor se comparado aos da mineração.

A interpretação da dinâmica paisagística segundo a tipologia de sistemas apresentada demonstra de maneira clara a excelência da bacia hidrográfica como unidade de processo-resposta, corroborando sua eficiência na qualidade de referencial espacial para os programas voltados ao planejamento e à gestão territorial. O reajuste das formas em resposta às modificações no regime dos fluxos de matéria e energia é uma realidade sistêmica passível de comprovação empírica, e na bacia do córrego São Tomé atinge apreciável viabilidade didática.

A ECODINÂMICA DA PAISAGEM

De acordo com os procedimentos anteriormente discutidos, as unidades morfodinâmicas identificadas são apresentadas no quadro 1, seguido de suas respectivas caracterizações. Segundo o grau de instabilidade morfodinâmica e descartando a situação de estabilidade, foram discernidas as seguintes classes: *meios intergrades com potencial de instabilidade*, *meios moderadamente instáveis*, *meios fortemente instáveis* e *meios de instabilidade generalizada*.

Quadro 1 - Unidades morfodinâmicas e suas respectivas valorações

UNIDADES MORFODINÂMICAS	VALOR ATRIBUÍDO
Meios intergrades	<4
Meios medianamente instáveis	4-8
Meios fortemente instáveis	8-12
Meios de instabilidade generalizada	>12

Na área estudada os *meios intergrades* correspondem às áreas recobertas por fragmentos de mata latifoliada estacional semidecidual. A presença da vegetação arbórea confere relativa estabilidade às vertentes, com situação similar à condição de biostasia (ERHART, 1966) ou de fitostasia, conforme sugere Tricart (1977). Entretanto, tais setores não estão isentos da atuação de processos físicos. Movimentos de massa lentos e contínuos podem ser verificados através dos pequenos sítios de acumulação que se formam na base das vertentes e que são, por sua vez, retirados e transportados de forma mais eficaz na estação chuvosa pelas descargas mais potentes.

Isso ocorre porque a interceptação não inibe por completo o impacto da chuva sobre a superfície, permitindo a passagem de considerável volume d'água para os andares inferiores e superfície.

Foram enquadrados como *meios moderadamente instáveis* os pontos mais fracamente dissecados cujas declividades são mantidas abaixo de 30%. São áreas ocupadas por pastagem semi-intensiva, atapetadas por gramíneas e com ocorrência conspicua de Cambissolos.

Operam nesses meios algumas ações geomórficas continuadas, morfologicamente materializadas pelos terracetes que se formam pela passagem contínua do gado e que podem ser a condição inicial para o desenvolvimento de processos erosivos mais graves. A erosão laminar é o processo morfogenético que predomina nas vertentes, e é responsável por notória perda de solo. Esta categoria padroniza a maior parte da bacia.

Os *meios fortemente instáveis* correspondem ao setor quartzítico correspondente ao entorno das lavras, à jusante, e aos setores gnáissicos associados a pastagens, porém mais dissecados e com declividades mais acentuadas em relação à classe anterior, individualizando-se dos *meios moderadamente instáveis* de maneira brusca no que tange aos processos morfogenéticos, que atuam aqui de forma mais vigorosa e acelerada. Tais setores interagem de forma mais estreita com as áreas de operação de lavra, além de acomodarem um número maior de animais no pasto; verifica-se assim ocorrência de erosões laminares e presença de ravinas, que, conforme querem Tricart e Kiewietdejonge (1992), se efetivam na forma de sulcos com profundidade superior a 15 cm. As erosões laminares asseguram descarnamento mais efetivo da tecitura geocológica superficial nesses meios, que se individualizam em um amplo setor à jusante da formação do córrego São Tomé em sua margem direita.

As áreas fortemente instáveis são marcadas por nítido predomínio dos processos morfogenéticos frente a pedogênese, sendo notória a evolução mais acelerada das encostas. No entanto, tais processos não ocorrem de maneira crônica e descontrolada, distribuindo-se descontinuamente no espaço interno da bacia. De acordo com Tricart (1968) tais fenômenos descontínuos são gerados em intervalos longos, de maneira que a pedogênese é capaz de se desenvolver plenamente entre as duas manifestações erosivas.

No quartzito a instabilidade está associada à mineração, que padroniza extensas áreas degradadas definidas por *meios de instabilidade generalizada*. São encostas representativas de áreas degradadas repletas de pilhas de estéril proveniente da extração, provocando inumação e franca degradação dos peculiares campos rupestres existentes no local. O setor é marcado por constante mobilização de material e pela presença do descomunal volume de rejeito de lavra que inviabiliza o pleno desenvolvimento dessa vegetação. A contribuição anômala expressa pelo estéril da mineração e as severas modificações na geometria das encostas alteram os fluxos de matéria e energia ao longo do subsistema vertente. A perda de biomassa vigente fornece uma superfície de maior exposição, favorecendo o desgaste mecânico e o deslocamento da rocha, propriedades que caracterizam a unidade litológica em questão.

A mineração modifica rigorosamente a energia do relevo: ao mesmo tempo em que expõe taludes verticais a subverticais, é responsável pelo aplainamento da serra em outros setores. A área é recoberta por grandes blocos, seixos e areias quartzosas que são cons-

tantemente transportadas pelo escoamento superficial, pela ação eólica e por rolamento gravitacional. Os processos de retirada, transporte e deposição das partículas são extremamente dinâmicos, e modificam perenemente a paisagem superficial. Os rejeitos deslocados pelas vertentes coletoras atingem inexoravelmente os canais fluviais a elas conectados, exercendo modificações severas na morfologia fluvial, conforme já fora comentado.

O quadro 2 sintetiza as diferentes classes morfodinâmicas em função das variáveis levadas em conta para a sua identificação, e a figura 5 é o documento síntese que representa tais classes na bacia hidrográfica, que possui forte afinidade com o método de sobreposição de mapas aplicado à Avaliação de Impactos Ambientais (AIA).

Conforme comentado, a atividade minerária constitui agente fundamental na definição de um quadro de instabilidade morfodinâmica generalizada, quadro este que se aprofunda em função das declividades consideráveis, que facilmente ultrapassam a ordem de 50% e catalisam a movimentação dos materiais e desestruturação dos fluxos superficiais. As unidades designadas como *altamente instáveis* e *moderadamente instáveis* constituem, respectivamente, área de influência direta e indireta do empreendimento mineiro, o que, somado às formas de uso do solo padronizadas em pastagens e pequenas glebas cultivadas define tais quadros morfogenéticos, que se diferenciam pela maior influência dos impactos da mineração e em função do declive (mais acentuado nos *meios altamente instáveis*), possibilitando o discernimento de situações morfogenéticas distintas operantes em coberturas pedológicas e contextos topográficos semelhantes. A situação transicional (*intergrade*) é fortemente influenciada pelo remanescente vegetal, que faz por desestimular os processos erosivos e materializar um geoambiente particular do ponto de vista fisionômico e morfodinâmico.

Quadro 2 - Classes morfodinâmicas segundo propriedades do meio físico e uso do solo

UNIDADES MORFODINÂMICAS	VALOR ATRIBUÍDO
Meios intergrades	<4
Meios medianamente instáveis	4-8
Meios fortemente instáveis	8-12
Meios de instabilidade generalizada	>12

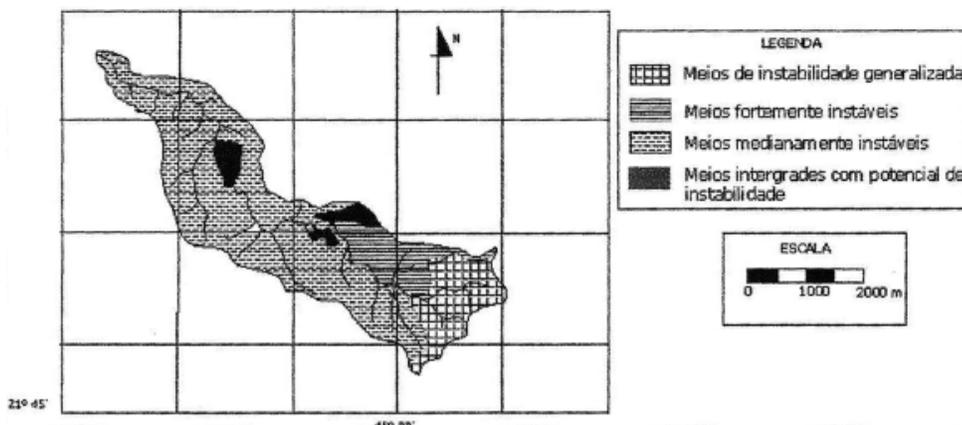


Figura 5 - Carta ecodinâmica da bacia do Córrego São Tomé

DISCUSSÃO COMPARADA

Os recursos metodológicos testados conduziram a resultados condizentes com as propostas que trazem em seu escopo, e não registram entre si incongruências exacerbadas ou grandes disparidades. Ao contrário, os resultados obtidos, da maneira que foram apresentados, convergem de forma a incidir para um entendimento integrado entre processos físicos, ecológicos e antropogênicos definidores da dinâmica da paisagem, o que advoga fortemente em favor de esforços de integração de abordagens na investigação dos processos vigentes.

O estudo da fisiologia da paisagem permitiu uma diferenciação de áreas precisas dentro dos limites da bacia de drenagem, uma vez que cuida da compartimentação do meio físico – e os compartimentos deverão de apresentar suas respectivas coberturas superficiais – e leva em conta a dinâmica atual do espaço em questão. No tocante à história geomorfológica, a compartimentação possibilitou a definição geral do posicionamento das diferentes superfícies geomorfológicas, de erosão e sedimentação, subsidiando assim as interpretações paleogeográficas em escala local e regional.

A identificação das áreas de ocorrência de sedimentos quaternários também se reveste de grande importância em função do interesse que tais depósitos representam para a ocupação humana. É indispensável o conhecimento das propriedades geotécnicas dos sedimentos e solos do Quaternário, muitas vezes inconsolidados, para a segurança das obras de engenharia. Ademais, tais ambientes descontínuos restritos a ambientes de acumulação são depositários de importantes informações paleogeográficas e paleoclimáticas, registradas nos conteúdos sedimentares e paleontológicos fundamentais necessários para as interpretações e reconstruções paleoambientais.

A abordagem pautada na proposta de Chorley e Kennedy não tem interesse direto na compartimentação do relevo. Severamente modelística, sua operação é facilmente levada a efeito empiricamente. Os trabalhos de campo permitem a visualização imediata da proposição de seus formuladores, permitindo uma apreensão qualitativa da natureza dos fluxos de matéria e energia e as respostas dadas pelo sistema morfológico, bem como detectar diferentes situações de resiliência e avaliar e prever possíveis rompimentos de limiar, oferecendo prognósticos aceitáveis acerca de sua evolução, assumindo assim uma dimensão preditiva bastante contundente. Tais reajustes podem ser registrados em tempo real, conforme a modalidade e intensidade do controle antrópico, caso da prática minerária processada na bacia. Vêm à tona conceitos como perfil de equilíbrio, estruturados em formulações oriundas da Física (Lei do Mínimo Esforço). Em síntese, tal como a proposição anterior, esta também cuida do estudo da dinâmica dos sistemas naturais e de suas interações com o sistema antropogênico, sendo também apresentada em diferentes níveis de abordagem ligados entre si, da morfologia e processos físicos vigentes ao controle humano incrementando a complexidade do quadro morfogenético.

Não menos, a consagrada abordagem ecodinâmica de Jean Tricart também tem por objetivo, da maneira que foi apresentado, estudar a dinâmica das paisagens. Nesse caso, a diferenciação de áreas tem por fundamento um balanço entre morfogênese e pedogênese sob estreita relação com os processos ecológicos, sendo apresentada segundo uma terminologia qualitativa que indica graus de fragilidade ou instabilidade morfodinâmica dos sistemas naturais, e que tem como produto final documentos cartográficos de síntese interessantes para a definição de potencialidades e restrições de uso do solo. É viável a aplicação deste sistema metodológico em processos de Avaliação de Impactos Ambientais em função de sua afinidade com o método de sobreposição de mapas, o que expande a inserção e atuação do geomorfólogo que domina esta técnica em tais projetos além dos diagnósticos temáticos de sua alçada mais direta, agregando assim importância ao seu papel.

O estudo da dinâmica do meio físico, para partilhar de maneira integrada de projetos interdisciplinares, não deve se pautar exclusivamente nas relações entre pedogênese e

morfogênese em função da imensa gama de processos químicos e mecânicos que interferem na evolução da paisagem. Entretanto, essa orientação metodológica é deveras viável no estudo de áreas antropizadas e de morfogênese acelerada por desequilíbrio provocado pelo homem. Tem por capacidade nata discernir e espacializar diferentes quadros geomórficos, sendo bastante recomendável para o estudo do meio físico em ecossistemas naturais e nas áreas rurais, onde o ambiente natural foi modificado, mas o solo não se encontra encoberto por pavimentação da maneira que é nas áreas urbanas, subsidiando assim laudos e pareceres sobre a condição do terreno.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As três formulações metodológicas utilizadas estão estruturadas de maneira que sua aplicação conduziu a enfoques característicos que levaram a resultados que se desdobraram em diferentes visões da dinâmica da paisagem, por constituírem variações acerca do mesmo tema central, para o qual as três linhagens metodológicas apontam. A abordagem integrada é exequível e amplifica o entendimento sobre a dinâmica operante na paisagem superficial.

Por fim, é cabível reconhecer que a abordagem integrada dos três recursos metodológicos pode ser empreendida desde a fase de pesquisa mineral, oportunidade na qual pode apontar as áreas mais favoráveis e restritivas para abertura de lavras, passando pelo estudo integrado dos efeitos engendrados no meio físico e dos processos de degradação ambiental que vem à reboque na fase de exploração, auxiliando, assim, de maneira direta desde a mitigação dos impactos até a recuperação das áreas degradadas nas minas abandonadas ou fechadas, contando preferencialmente com a iniciativa do poder público e dos concessionários para cumprir a lei, apoiados ou forçados pela vontade popular.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. Um Conceito de Geomorfologia à Serviço das Pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**. São Paulo, v. 18, 1969.

BACCI, D. C. **Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas**: avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Rio Claro, 2000, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

BENITES, V. M. et al. Solos e vegetação nos complexos rupestres de altitude da Mantiqueira e do Espinhaço. **Floresta e Ambiente**, v. 10, n. 1, p. 76-85, 2003.

CHORLEY, R. J. **Spatial analysis in Geomorphology**. London: Harper & Row, 1972. 393p.

CHORLEY, R. J.; HAGGET, P. **Modelos físicos e de informação em Geografia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1975. 260p.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical Geography: a system approach**. London: Prentice Hall, 1971.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec-Edusp, 1979. 106p.

_____. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

_____. O Desenvolvimento teórico analítico em Geomorfologia: do ciclo da erosão aos sistemas dissipativos. **Geografia**. Rio Claro, v. 14, n. 28, p. 15-30, 1989.

_____. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Buchler, 1999.

EBERT, H. **Os Paraibides entre São João Del Rey, Minas Gerais e Itapira, São Paulo e a bifurcação entre Paraibides e Araxáides**. Rio Claro, UNESP, 1971, 37p..

ERHART, H. A Teoria Bio-Resistásica e os problemas biogeográficos e paleobiológicos. **Notícia Geomorfológica**. Campinas: n. 11, p. 51-58, 1966.

FERNANDES, T. M. G. **Caracterização petrográfica, química e tecnológica do centro produtor de São Thomé das Letras no sudoeste do Estado de Minas Gerais**. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

FERNANDEZ, O. V. Q. O papel dos grandes detritos lenhosos na morfologia e sedimentologia do córrego Guavirá, Marechal Cândido Rondon (PR). **Geografia**, Rio Claro, v. 29, n. 2, p. 229-240, 2004.

FONSECA, F. F. A. Mineração e meio ambiente. In: TAUKE, S. M.; FOWLER, H. G. **Análise Ambiental: uma visão multidisciplinar**. São Paulo: ed. UNESP, 1991.

GREGORY, K. J. **A Natureza da Geografia Física**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1992. 367p.

HOWARD, A. D. Equilíbrio e dinâmica dos sistemas geomorfológicos. **Notícia Geomorfológica**. Campinas, n. 26, p. 3-18, 1973.

MARQUES NETO, R. **Abordagem sistêmica em geomorfologia e diagnóstico do meio físico para avaliação de impactos ambientais decorrentes da mineração nas bacias do Córrego São Tomé e do Ribeirão Vermelho**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia). IGCE. UNESP – Rio Claro, 2004.

MARQUES NETO, R.; LADEIRA, F. S. B. Estudo dos impactos causados por mineração através da abordagem sistêmica em geomorfologia. IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMORFOLOGIA E I ENCONTRO SUL-AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA 5. **Anais...** UFSM. Santa Maria, 2004.

MARQUES NETO, R.; VIADANA, A. G. Instabilidade morfodinâmica na bacia do Córrego São Tomé – São Thomé das Letras (MG). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA 11. **Anais...** USP, São Paulo, 2005.

O ESTADO DE MINAS. (www.estaminas.com.br). Acesso em: 28/11/2006.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo: FFLCH. USP. n. 8. p.63-74, 1994.

SANTOS, L. M.; EUSTÁQUIO NETO, S. Recomposição ambiental e reversão de impactos sobre recursos hídricos em empresa mineradora de pequeno porte: estudo de caso da mina de quartzito da Sical Industrial. In: DOMINGUEZ, A. F. (Org.) **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Agência Nacional de Águas (ANA). Brasília: ANA, 2006. 334p.

SANTOS, M. DOS. **Serra da Mantiqueira e Planalto do Alto Rio Grande: a bacia terciária de Aiuruoca e evolução morfotectônica**. Rio Claro, 1999. 134p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

TRICART, J. As relações entre a morfogênese e a pedogênese. **Notícia Geomorfológica**. Campinas, v. 8, n.15, p. 6-18, 1968.

_____. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: SUPREN, 1977.

_____. **Géomorphologie Applicable**. Masson: Paris, 1978. 204p.

TRICART, J.; KIEWIETDEJONGE, C. - **Ecogeography and rural management**. New York: Longman Scientific & Technical, 1992.

TROUW, R. A. J. et al. Evolução estrutural e metamórfica de uma área a SE de Lavras – Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 31. **Anais...** Santa Catarina, 1980. p. 2773-2784.

_____. Os grupos São João Del Rey, Carrancas e Andrelândia interpretados como continuação dos grupos Araxá e Canastra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 33. **Anais...** Rio de Janeiro, 1984. p. 3227-3229.

VICENTE, L. E.; PEREZ FILHO, A. Abordagem sistêmica e Geografia. **Geografia**. v. 28, n. 3, p. 323-344, 2003.

Recebido em dezembro de 2009

Revisado em abril de 2010

Aceito em junho de 2010

