

CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL NATURAL DE ERODIBILIDADE ATRAVÉS DA SISTEMÁTICA MORFOESTRUTURAL E MORFOTECTÔNICA APLICADA A OBRAS LINEARES – DUTOVIAS

Fabiano do N. Pupim¹ (UNESP), Jairo R. Jiménez-Rueda (UNESP), Juércio T. de Mattos (UNESP)

¹Av: 4A n.249, Cidade Nova, Rio Claro-SP, CEP: 13506-770, e-mail: fabianopupim@yahoo.com.br

Resumo: Os processos que induzem aos problemas de erosão podem ser constantes em áreas sob a intervenção de obras lineares, inclusive dutovias, pois nem sempre tais problemas são levados em consideração no planejamento e implantação dessas obras, elevando posteriormente os custos de gestão e manutenção dos empreendimentos. É convencional e sistemático que se estabeleça às classes de erodibilidade sobre unidades de mapeamento de solos e rochas, visto que a erodibilidade é o atributo mais importante do processo erosivo e é desencadeador tanto da erosão laminar como linear. A Caracterização de áreas de susceptibilidade a erosão, na quadrícula de São Carlos-SP, escala 1:100.000, leva em consideração o potencial natural de erodibilidade pela sistemática morfoestrutural e morfotectônica. Esta decisão foi tomada tendo em vista que os mapeamentos existentes na área (geológico e pedológico) não foram gerados com esse propósito, e assim, não apresentam informações adequadas à problemática. A sistemática baseia-se nos processos deformacionais dos maciços, representados por falhas (lineamentos estruturais e traços de junta) e feições anômalas (altos e baixos estruturais). A análise dessas feições permite inferir fatores como permeabilidade, infiltração e grau de cisalhamento da região, fatores esses que condicionam o grau de erodibilidade. As análises foram realizadas a partir do MNT, obtido das cartas topográficas, escala 1:50000 e elaborados dois mapas básicos (lineamentos estruturais e traços de junta) e um analítico (feições anômalas). A análise das feições anômalas permite verificar a presença e o grau de deformação da área, estabelecer as estruturas deformacionais (altos e baixos estruturais). Sobre o mapa lineamentos estruturais foram analisados os pontos de cruzamento de lineamentos de diferentes direções e posteriormente feita a contagem da frequência desses pontos por unidade de área, possibilitando a modelagem estatística da distribuição espacial, gerando o mapa de densidade de cruzamentos de lineamentos estruturais, que permite determinar regiões com maior percolação de fluidos no maciço. Sobre o mapa de traços de junta foi realizada uma análise espacial para identificar as duas direções de maior frequência de juntas, assim estabelecer os máximos 1 e máximos 2 para identificar as áreas com mudanças bruscas de direções. Nestas áreas onde ocorrem mudanças bruscas de direções de máximos de junta, conseqüentemente haverá intensa percolação de fluidos, responsável pela maior alterabilidade do complexo rocha/solo, facilitando a instalação de processos erosivos, aumentando a instabilidade da área e conseqüente impacto a obras lineares. O resultado é expresso no Mapa de Potencial Natural de Erodibilidade, através da integração dos produtos anteriores, estabelecendo-se classes de susceptibilidade a erosão.

Palavras-chave: Erosão, Obras Lineares, Planejamento.

1. INTRODUÇÃO

As obras lineares de engenharia (rodovias, ferrovia, dutovias, linhas de transmissão, entre outros) estão presentes em todo o território nacional, sendo de grande importância para o desenvolvimento e integração do país. Tais obras estão implantadas em diferentes regiões, gerando por vezes desequilíbrios ambientais que induzem a impactos. Estes desequilíbrios conduzem a problemas como o aumento da suscetibilidade a erosão, movimentos de massa e assoreamento, efeitos que podem comprometer a integridade e segurança da obra e seus usuários. Para Bellia e Bidone (1993) “*é fundamental adequar o projeto às características do meio ambiente, que é o suporte de sua inserção. A noção de adequação da obra ao meio ambiente, portanto, é convergente com a noção de economia e proteção dos investimentos efetuados*”.

O estudo visa a geração de um mapa de potencial natural de erodibilidade (PNE) na faixa do Gasoduto Bolívia-Brasil, região centro-oeste do Estado de São Paulo, mais especificamente a quadrícula de São Carlos, escala 1:100.000. A escolha dessa área se deu por contar com inúmeras obras lineares que sofrem constantemente com problemas de instabilidade do terreno e desequilíbrios ambientais já descritos em estudos anteriores (Jiménez-Rueda, 1993; Daitx *et al.*, 2005).

Geralmente os mapas de erodibilidade são elaborados visando a caracterização de risco de erosão, sendo convencional que se estabeleça as classes de erodibilidade sobre unidades de mapeamento de solos e rochas. Mas no presente trabalho optou-se por estabelecer as referidas classes a partir de análises do comportamento

estrutural e tectônico da área, utilizando-se de modelos numéricos do terreno (MNT), pela sistemática morfoestrutural e morfotectônica (Jiménez-Rueda e Mattos, 1992).

A decisão por este enfoque é devida ao fato de que os mapeamentos pedológicos e geológicos existentes na região não atendem as especificidades necessárias, não possuem informações uniformes para toda a área, tanto em dados quanto em escalas e principalmente por não terem sido realizados com o presente propósito (estudo da erodibilidade).

É importante ressaltar que o estudo faz parte do trabalho de conclusão de curso do primeiro autor, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que visa o zoneamento geoambiental como subsídio à implantação e gestão das diferentes obras lineares presentes na área de estudo (quadrícula de São Carlos, escala 1:100.000). Tal estudo leva em consideração diversos parâmetros ambientais (geológico, geomorfológico, pedológico e climático), além dos aqui abordados (estrutural e tectônico).

2. REVISÃO DA LITERATURA

A sistemática morfoestrutural e morfotectônica parte dos estudos desenvolvidos para a interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite, inicialmente estabelecido por Guy (1966), implantada para as condições brasileiras por Riverau (1972) e Soares e Fiori (1976), adaptado para imagens de satélite por Veneziani e Anjos (1982).

Soares e Fiori (1976) conceituam três processos na interpretação de fotografias aéreas em geologia: a) fotoleitura: reconhecimento e identificação dos elementos das imagens com os objetos correspondentes e sua repartição; b) foto-análise: estudo das relações entre as imagens, associação e ordenação das partes de imagens; c) fotointerpretação: estudo da imagem fotográfica visando à descoberta e avaliação, por métodos indutivos, dedutivos e comparativos do significado, função e relação dos objetos correspondentes às imagens.

Partindo desses pressupostos, Riverau (1972), Mattos et al. (1982) e Soares et al. (1982) desenvolveram os princípios da análise morfoestrutural para a geologia do petróleo em bacias sedimentares, baseada na interpretação de informações básicas dos elementos de drenagem e relevo e suas relações espaciais, onde as morfoestruturas surgem como feições anômalas dentro da tendência regional, representando deformações dúcteis dos maciços. O princípio da análise baseia-se na premissa de que estruturas podem ser refletidas em superfície e que esse reflexo é passivo de identificação através de produtos de sensoriamento remoto. Concomitantemente, e partindo das mesmas premissas, foi desenvolvida análise morfotectônica, que procura identificar alinhamentos de relevo e drenagem, de grandes e pequenas extensões, que são interpretados como deformações rúpteis da crosta terrestre, evidenciando áreas com diferentes graus de estabilidade tectônica.

Essas análises foram posteriormente utilizadas para prospecção de águas subterrâneas em regiões cristalinas (Madrucci et al., 2003), em análises ambientais, tais como controle de aplicação de vinhoto na produção sucroalcooleira (Jiménez-Rueda et al., 1989a), no planejamento territorial (Ohara et al., 2003), estudos agroecológicos (Jiménez-Rueda et al., 1989b) e definição de traçados de obras lineares (Franzoni, 2000; Caetano 2006).

Mattos et al. (2002) e Jiménez-Rueda et al. (2006) utilizaram-se da sistemática morfoestrutural e morfotectônica como critérios para mapeamento de classes de risco à erosão de solos, partindo da análise de imagens de satélite, para duas áreas distintas do sudeste brasileiro (Quadrilátero Ferrífero – MG e Vale do Paraíba do Sul - SP), alcançando ótimos resultados, determinam que o fator mais importante para se definir as classes de erodibilidade é o estabelecimento da permeabilidade do solo/rocha, associada a classes de declividade. Onde a permeabilidade é obtida em função dos vazios que existem entre os componentes minerais e sua matriz nos solos/rochas e das descontinuidades existentes nestes corpos por efeito das deformações tectônicas (densidade de fraturamento).

3. METODOLOGIA (SISTEMÁTICA)

Para o desenvolvimento do estudo empregaram-se os seguintes materiais: a) cartas topográficas do IBGE, escala 1:50.000 (São Carlos, Itirapina, Corumbataí e Rio Claro, todas no Estado de São Paulo), onde foram extraídas as curvas de nível, pontos cotados e rede de drenagem, que posteriormente foi completada, para a confecção do MNT; b) software *ArcGis 9.0* e sua extensão *Spatial Analyst*, onde foram digitalizadas e georreferenciadas as informações das cartas topográficas na Projecção UTM, Datum Córrego Alegre-MG, zona 23, para a geração do MNT e seus derivados (sombreamento e curvatura), que compostos entre si e integrados a rede de drenagem, serviram de base para a análise morfoestrutural e morfotectônica.

A sistemática trata de quatro etapas: a) edição e tratamento dos dados topográficos, para a geração do MNT, e organização de um banco de dados em ambiente SIG (Sistema de informações Geográficas); b) interpretação estrutural e tectônica do produto integrado MNT + rede de drenagem, para geração de mapas morfoestruturais e morfotectônicos (lineamentos, cruzamento de lineamentos e traços de junta); c) análise por geoprocessamento dos diferentes produtos para geração do mapa do potencial natural de erodibilidade (PNE).

3.1 Edição e Tratamento de Dados

Após a aquisição e seleção dos produtos cartográficos os mesmos foram scanneados, digitalizados e tratados com o auxílio do *software ArcGis 9.0*, posteriormente se fez a modelagem numérica do terreno.

O modelo numérico de terreno (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (FELGUEIRAS, 2004). Os MNT são de grande utilidade para as ciências da terra e áreas afins, pois a partir da modelagem são realizadas análises e interpretações de diversos elementos que compõem o meio físico, como elementos de relevo (tipo de encosta, declividade, dissecação), padrões e arranjos estruturais e de drenagem, morfométricos e morfológicos.

O MNT foi gerado através do *software ArcGis 9.0*, extensão *Spatial Analyst*, módulo *Topo to Raster*, onde foram inseridos os arquivos digitais de curvas de nível (equidistância de 20m), pontos cotados e rede de drenagem, cada um desses arquivos com seus referentes valores de elevação, exceto a drenagem.

O módulo *Topo to Raster* foi escolhido por utilizar uma técnica de interpolação por diferenças finitas, em que combina a eficiência de uma interpolação local (por exemplo, o método do Inverso do Quadrado da Distância), com métodos de interpolação global que utilizam uma superfície de continuidade, como o interpolador Kriging (McCooy e Johnston, 2002). Os arquivos de saída são no formato de imagens *raster* e as dimensões das células unitárias estabelecidas para o MNT foram de 10m por 10m.

Com o MNT gerado e corrigido os possíveis erros, foram derivados os modelos de sombreamento, com inclinação solar de 45° (altitude) e diferentes azimutes (45° e 315°) e curvatura, que sobrepostos possibilitam uma melhor visualização dos elementos que compõem a paisagem, sendo a base para futuras interpretações de rede de drenagem, morfométricas, morfoestrutural, tectônica e relevo (Figura 1).

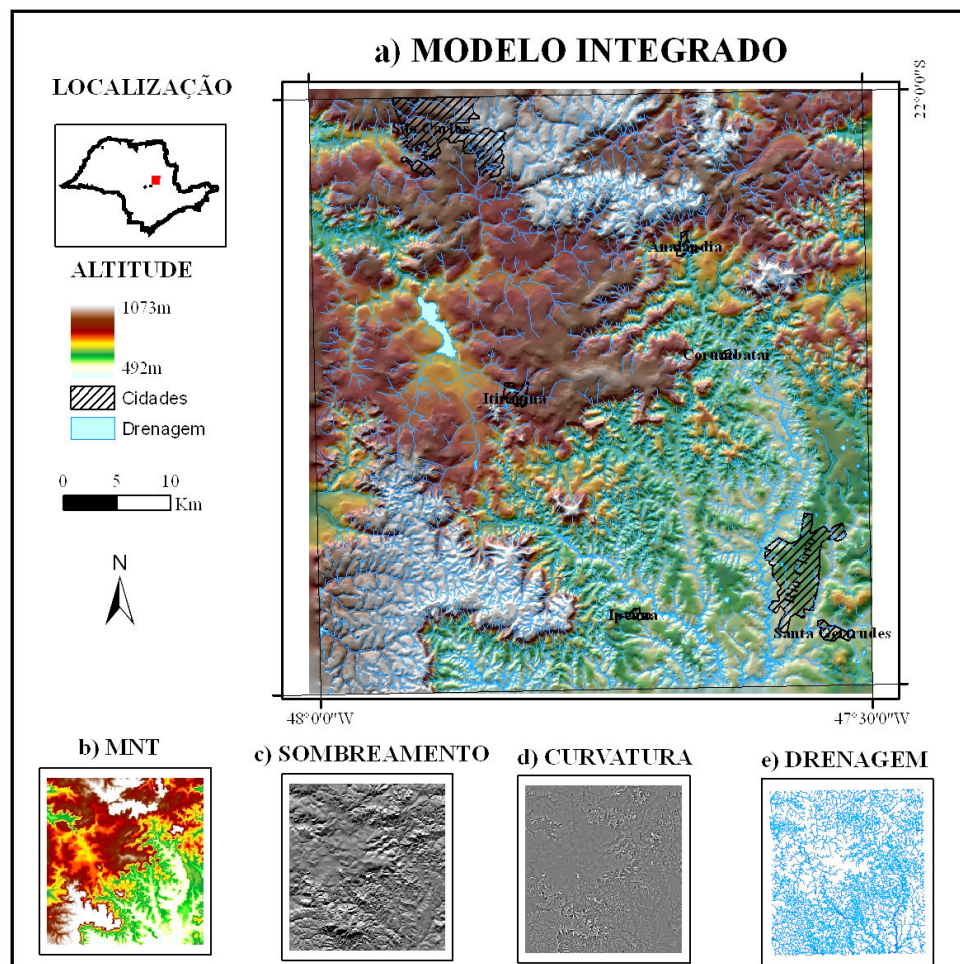


Figura 1: Representação, passos e evolução da modelagem (MNT). A integração das figuras "b", "c", "d", "e" gerou a figura "a", sendo essa a base de todas as análises posteriores.

As imagens processadas foram inseridas num banco de dados espacial de modo a se realizar a fotointerpretação dos lineamentos e morfoestruturas. Posteriormente, o mapa morfoestrutural e os mapas morfotectônicos foram inseridos neste banco para realizar as análises espaciais entre as morfoestruturas, lineamentos, cruzamento de lineamentos, zonas de juntas e variação de máximos de 1 e 2.

As análises e interpretações posteriores foram realizadas em ambiente SIG, interpretação em tela, a partir da sobreposição dos produtos: MNT, Sombreamento, Curvatura e Rede de Drenagem. Tal procedimento permite a visualização do relevo de forma pseudo estereoscópica, realçando as estruturas e oferecendo maior destaque visual das feições em superfície real. Possibilita também a identificação do comprimento das feições a serem identificadas.

3.2 Morfoestrutura

A análise de feições morfoestruturais se dá a partir do estabelecimento de padrões de assimetrias-simetrias das bacias hidrográficas e das feições de drenagem anelares e radiais. Sobre as feições de assimetria-simetria é possível delinear curvas não cotadas que representam flexuras estruturais hipotéticas, paralelas aos estratos existentes na área, cujos contatos nem sempre são visíveis em campo (altos e baixos estruturais) e descontinuidades estruturais (lineamentos e falhas) (Mattos *et al.*, 1982), dando origem ao mapa morfoestrutural (Figura 2A).

O mapa morfoestrutural deverá ser integrado de maneira qualitativa, pois esse não possui feições que podem ser tratadas estatisticamente e conseqüentemente quantificadas, dessa maneira sua caracterização frente ao potencial de erodibilidade segue as determinações de Jiménez-Rueda *et al.* (1993) (Tabela 1).

TABELA 1 : COMBINAÇÕES ENTRE MORFOESTRUTURA E MORFOMETRIA.

MORFOESTRUTURA/ MORFOMETRIA	DESCRIÇÃO
Alto Estrutural/ Alto Topográfico (AA)	Pedogênese maior que morfogênese; forte intemperismo; argilominerais caulinita e gibbsita; intensa circulação de água; intensa oxidação; hidrólise total; processos de alitização, latossolização e laterização (em paleoambientes tropicais). Erodibilidade Baixa.
Alto Estrutural/Baixo Topográfico (AB)	Pedogênese maior que morfogênese; forte intemperismo; argilominerais caulinita, gibbsita e esmectita; circulação de água média/alta; oxidação; hidrólise total/parcial; processos de alitização, latossolização, laterização, argilização e melanização. Erodibilidade Moderada/Alta (exorréica)
Baixo Estrutural/Alto Topográfico (BA)	Pedogênese maior que morfogênese; intemperismo moderado/forte; argilominerais caulinita e esmectita; circulação de água baixa e direcionada; moderada redução; hidrólise parcial/total; processos de latossolização e argilização. Erodibilidade Alta/Moderada (exorréica)
Baixo Estrutural/Baixo Topográfico (BB)	Pedogênese menor que morfogênese; fraco intemperismo; argilominerais de esmectita; circulação de água alta e direcionada; intensa redução; hidrólise parcial/incipiente; processos de argilização, melanização e gleização, com concentração de Na, Ca, CO ₃ , Si e Mg. Erodibilidade Muito Alta (endorréica)

É válido ressaltar que o detalhe do mapa morfoestrutural depende da escala de trabalho, assim como os demais mapas temáticos, que no caso são compatíveis com a escala 1:100.000, representando feições morfoestruturais regionais.

3.3 Morfotectônica

Segundo Loczy e Ladeira (1980) a tectônica investiga a morfologia e a associação das estruturas de tipos similares, classificando-as ou agrupando-as em zonas e regiões, procurando obter uma visão integrada das estruturas maiores e suas relações espaciais entre si.

Esta etapa consiste no estudo das estruturas que condicionam a drenagem e o relevo, sendo essas as feições lineares de drenagem (traços de juntas) e alinhamentos de drenagem (lineamentos estruturais) e suas relações espaciais, permitindo estabelecer e classificar zonas de diferentes graus de tectonismo, cisalhamento e ruptibilidade.

A extração dessas feições será realizada segundo Veneziani e Anjos (1982), que definem as lineações de drenagem como segmentos retilíneos de elementos texturais e a disposição destes em linha reta definem os alinhamentos.

3.3.1 Lineamentos

Os lineamentos estruturais são definidos por O'Leary *et al.* (1976) como uma feição linear, simples ou composta, contínua ou descontínua da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere substancialmente dos padrões de feições que lhe são adjacentes.

Tais lineamentos foram obtidos a partir de feições de drenagem e relevo devidamente alinhadas, gerando o mapa de lineamentos, e a intersecção de lineamentos, que ocorrem em diferentes direções, deram origem ao mapa de cruzamento de lineamentos (Figura 2B).

Tais feições evidenciam as áreas de alívio tectônico rúptil provocado, na maioria das vezes, por um processo cataclástico, indicando maior ou menor ocorrência de cisalhamentos (Rodrigues, 2000), representam a permeabilidade do terreno, principalmente os cruzamentos de lineamentos, que caracterizam zonas de maior variação de tensão, ocorrendo o maior número de fraturamento, possibilitando a maior percolação de fluidos pelo sistema solo/rocha, contribuindo no domínio da morfogênese sobre a pedogênese, aumentando a instabilidade do maciço e a possibilidade de erosão.

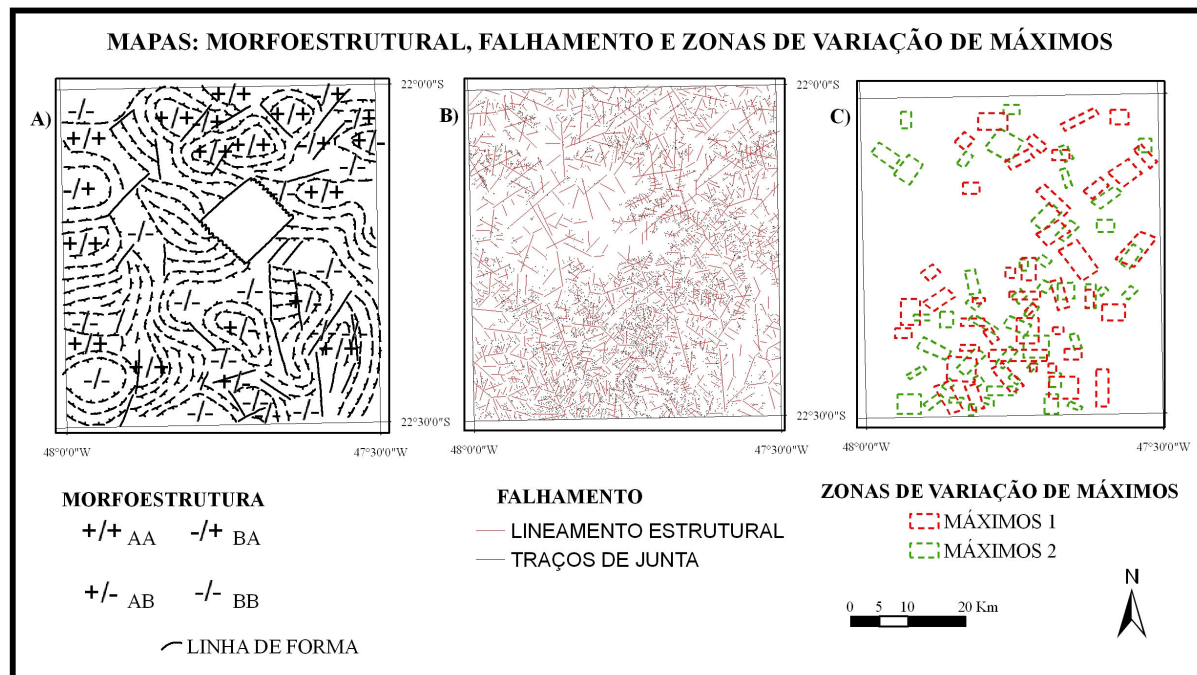


Figura 2: Mapas gerados a partir da análise da rede de drenagem e relevo: A) Morfoestrutural; B) Falhamento (lineamentos estruturais e traços de junta) ; C) Zonas de Variação de Máximos 1 e 2. Esses produtos fornecem informações diretas para o produto final.

Com o mapa de lineamentos estruturais e de cruzamento de lineamentos devidamente estabelecidos, os mesmos foram submetidos a análise estatística pelo estimador de densidade por Kernel, presente na extensão *Spatial Analyst* do software *ArcGis 9.0*. Tal estimador opera de forma que cada ponto corresponde apenas a ocorrência do evento, estimando a intensidade ou o número de eventos por unidade de área (Mccoy e Johnston, 2002), o mesmo pode também operar de forma que cada evento tenha um atributo com valor estabelecido (por ex. teor de argila), realizando operações de média e distribuição da densidade desse atributo.

A modelagem da densidade foi realizada a partir do estabelecimento da unidade de área com 3 Km de raio e células de saída de 100 m (unidade de representação no mapa). Posteriormente foram estabelecidas quatro classes de valor, de maneira que cada classe represente 25% dos valores totais (Muito Baixo; Baixo; Moderado; Alto).

Dessa maneira, foram gerados os mapas de densidade de lineamentos estruturais e de densidade de cruzamento de lineamentos (Figuras 3A e 3B), que são de grande utilidade para identificar a distribuição espacial regional do padrão de fraturamento, ruptibilidade, cisalhamento e conseqüente permeabilidade da área de estudo, contribuindo para a identificação de áreas com maior potencial natural de erodibilidade.

3.3.2 Traços de Junta

Loczy & Ladeira (1980) definem juntas como planos ou superfícies de fraturas que dividem as rochas e ao longo dos quais não ocorreu deslocamento das paredes rochosas paralelamente aos planos de fratura, ou se o deslocamento ocorreu ele foi mínimo e não visível.

O mapa de traços de junta (Figura 2C) foi obtido a partir do reconhecimento de lineações de drenagem, geralmente de 1ª ordem e por vez de 2ª ordem, com comprimento de até 0 a 300m, constituindo feições fortemente estruturadas unidirecionalmente. Posteriormente foi realizada a análise estatística para estabelecer a

densidade de traços de junta, seguindo os padrões anteriormente utilizados na análise de densidade de lineamentos e cruzamentos.

A partir do mapa de traços de junta, foi realizada uma análise espacial identificando as direções de maior frequência de traços de junta, por unidade de área (3 Km de raio), cada unidade de área foi analisada de forma independente de suas vizinhas. Essas direções são denominadas de máximo 1 e máximo 2 (primeira e segunda direção de maior frequência respectivamente), a partir da filtragem de máximos foi gerado o mapa de zonas de variação máximos 1 e 2 (Figura 3C).

A análise da filtragem dos traços de junta em máximos 1 e 2 tem como objetivo estabelecer a visão regional do processo deformacional e principalmente onde estes máximos mudam bruscamente de direção, o que denota que nestas regiões existe uma variação no regime do campo de tensão da deformação e, conseqüentemente, maior fraturamento do maciço rochoso e coberturas superficiais, o que caracteriza áreas de maior susceptibilidade erosiva (MATTOS *et al.*, 2002).

A partir do mapa de zonas de variação de máximos (ZVM) foi realizada uma análise a fim de classificar a região em função da relação traços de junta *versus* potencial de erodibilidade, onde se atribui o potencial de erodibilidade das zonas de variação de máximos 1 e 2, segunda Mattos *et al.* (2002) (Tabela 2).

TABELA 2: FEIÇÃO ASSOCIADA E ERODIBILIDADE

FEIÇÃO ASSOCIADA	ERODIBILIDADE
Superposição de Máximos 1 e 2	Muito Alta
Presença de Máximo 1	Alta
Presença de Máximo 2	Potencializa a classe encontrada

As áreas onde ocorrem superposições de ZVM 1 e 2 correspondem a um potencial de erodibilidade muito alto, pois são áreas onde os processos erosivos já se instalaram. Nas ZVM 1 o potencial de erodibilidade é alto e ZVM 2 atuando como zonas que podem potencializar o grau de erodibilidade da área, pois tais áreas possuem um equilíbrio dinâmico das formas de relevo quando não antropizados, mas se desestabilizam por qualquer intervenção antrópica.

3.4 Mapa de Potencial Natural de Erodibilidade

Das informações, obtidas a partir da sistemática morfoestrutural e morfotectônica, desenvolveu-se a ponderação de valores de informações temáticas utilizando a técnica Fuzzy. O operador lógico Fuzzy é uma técnica computacional de integração ou de modelamento em dados numéricos do meio físico realizado em SIG (Bonham-Carter, 1994). No presente trabalho utilizou-se da lógica Fuzzy na modelamento dos dados de densidade de lineamentos estruturais, densidade de cruzamentos de lineamentos e densidade de traços de junta, com o intuito de normalizá-los em escala de 1 a 4.

Essa técnica foi necessária para a Análise Multicriterial Ponderada (AMP), encontrado no módulo *Weighted Overlay*, d extensão *Spatial Analys*. Neste procedimento, diferentes fatores que influenciam o processo são sintetizados através da média ponderada dos planos de informação, podendo-se atribuir diferentes valores de importância (peso) a cada um.

No presente estudo os valores de importância foram atribuídos da seguinte maneira: 50% para Densidade de Cruzamento de Lineamentos; 25% para Densidade de Lineamentos Estruturais e 25% para Densidade de Traços de Juntas. Com essa sistematização elaborou-se um mapa do potencial natural de erodibilidade (Figura 3D), representado por classes de risco de erosão, onde foram estabelecidas quatro classes de valor, de maneira que cada classe represente 25% dos valores totais (Muito Baixo; Baixo; Moderado; Alto), que permitiu avaliar as áreas potencialmente vulneráveis a instalação de processos erosivos frente a intervenções antrópicas, como a implantação de obras lineares.

Aliado a análise anterior, não se pode deixar de considerar a verificação das zonas de variação de máximos e anomalias morfoestruturais (altos e baixos). Como estas zonas são anomalias localizadas, não são passíveis de modelamento pela AMP, sendo representadas no mapa do potencial natural de erodibilidade com zonas retangulares e formas pontuais, respectivamente, que não devem ser interpretadas como áreas fechadas ou pontos cotados, possíveis de mensuração, mas sim de forma qualitativa como segue nas Tabelas 1 e 2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a maior compreensão e correta interpretação do mapa do potencial natural de erodibilidade (Figura 3D), frente aos processos morfoestruturais e morfotectônicos que atuam ou atuaram na área, serão descritas as classes mapeadas e as principais feições potencializadoras associadas a essas, onde o resultado da interpretação corresponde a cinco classes de PNE (Muito Baixo; Baixo; Moderado; Alto; Muito Alto).

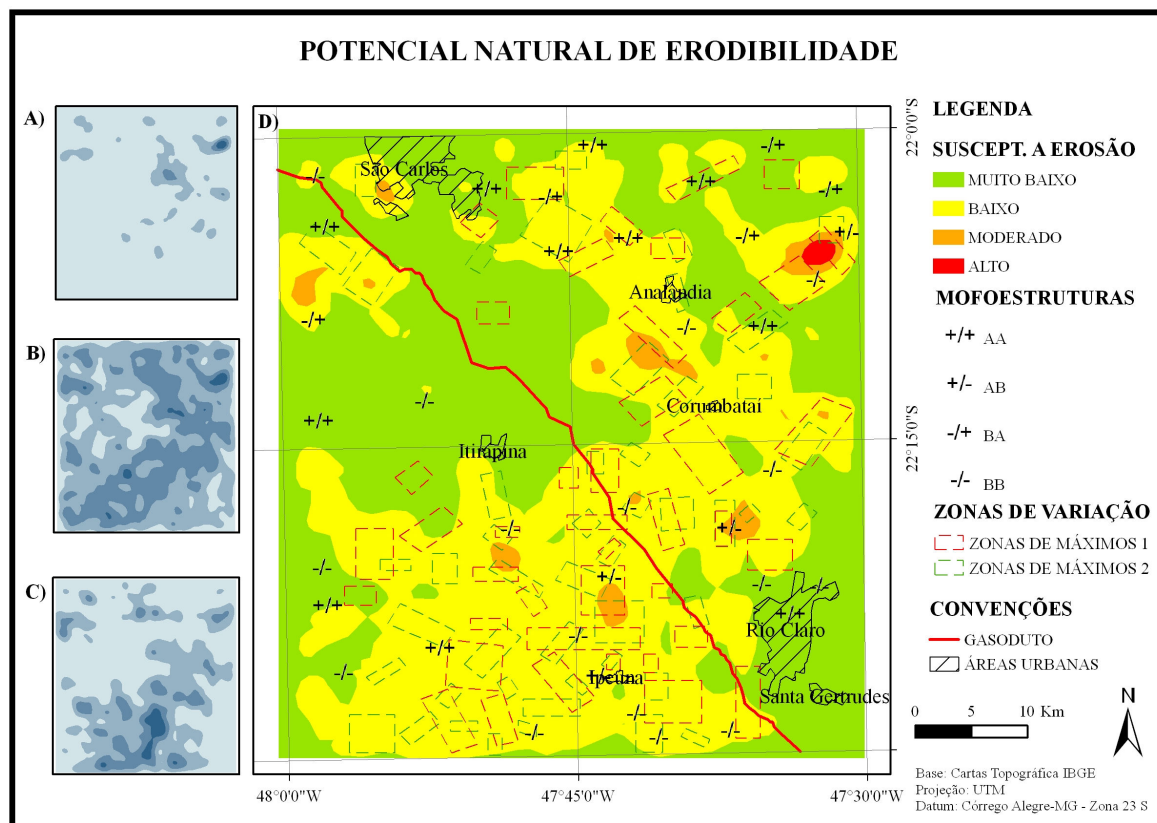


Figura 3: A integração dos mapas A) Densidade de Cruzamentos de Lineamentos, B) Densidade de Lineamentos Estruturais, C) Densidade de Traços de Junta possibilitou a geração de classes susceptibilidade a erosão, que conjugados com as morfoestruturas e zonas de variação resultam em D) Mapa do Potencial Natural de Erodibilidade.

- Classe 1: Potencial Natural de Erodibilidade Muito Baixo

Esta classe é definida considerando apenas as áreas representadas pela susceptibilidade a erosão muito baixa (verde), onde não ocorra nenhuma feição anômala associada.

Recomendações: áreas que apresentam baixas restrições ao uso e ocupação, exige manutenção mínima em condições naturais.

- Classe 2: Potencial Natural de Erodibilidade Baixo

Deve ser entendida como classe 2 as áreas onde a susceptibilidade a erosão é muito baixa associada a AA ou ZVM 2. Outra possibilidade é a presença de classe de susceptibilidade a erosão baixa (amarelo), associada ou não com AA.

Recomendações: áreas com baixas restrições ao uso, requerendo obras de pequeno porte para manutenção do equilíbrio ecogeodinâmico.

- Classe 3: Potencial Natural de Erodibilidade Moderado

Esta classe corresponde a diversas combinações como: áreas com muito baixa susceptibilidade a erosão associada a AA e ZVM 2; áreas de baixa ou muito baixa susceptibilidade a erosão associadas a AB; áreas de baixa susceptibilidade a erosão com a presença de ZVM 2, associada ou não a AA; áreas com susceptibilidade a erosão moderada (laranja) associada ou não a AA.

Recomendações: áreas que se possível devem ser evitadas no planejamento de implantação de obras lineares, em obras já instadas o monitoramento deve ser periódico para evitar possíveis problemas de instabilidade.

- Classe 4: Potencial Natural de Erodibilidade Alto

Nesta classe são identificadas as seguintes combinações: susceptibilidade a erosão baixa ou muito baixa associado a AB e ZVM 2; áreas onde ocorra a associação de duas das seguintes variáveis: susceptibilidade a erosão moderada, AB, ZVM 2; presença de ZVM 1 ou área com alta susceptibilidade a erosão (vermelho), exceto quando associado a BB ou ZVM 2.

Recomendações: áreas com fortes restrições ao uso e ocupação. Necessidade de grandes investimentos em infraestrutura para instalação e gestão de obras lineares.

- Classe 5: Potencial Natural de Erodibilidade Muito Alto

Esta classe ocorre com a presença de BB ou quando se associam duas ou mais variáveis a seguir: susceptibilidade a erosão alta, BA, ZVM 1 e ZVM 2.

Recomendações: áreas impróprias à ocupação, sem que haja estudo prévio para se estabelecer obras de sustentação à ocupação específica, alto custo de implantação e manutenção de obras. Quando na fase de gestão é imprescindível a realização de monitoramentos constantes para o controle do equilíbrio ecogeodinâmico.

Deve ser ressaltado que além das classes obtidas a partir da interpretação do mapa do PNE, Daitx *et al* (2005) avalia que para o planejamento, implantação e gestão de gasodutos os casos mais críticos de instabilidade ecogeodinâmica estão relacionados com a presença de feições morfoestruturais anômalas (altos e baixos estruturais), que são muito sensíveis a qualquer tipo de intervenção antrópica, podendo desencadear processos de ravinamento, voçorocamento, movimento de massa e rastejo, outro problema associado as anomalias BB é a corrosividade e condutividade, por se tratar de um sistema fechado, pouco percolativo, proporcionando o acúmulo de água, gerando um ambiente altamente redutor. Assim, tais anomalias devem ser evitadas no traçado de dutovias, mantendo uma distância mínima de 5Km de raio, e se já implantado o duto, esses locais devem ser mapeados com maior detalhamento.

A comparação dos dados obtidos com estudos realizados anteriormente (Jiménez-Rueda, 1993 e Melo, 1995) e a realização de trabalhos de campo permitiram confirmar a existência das estruturas mapeadas e suas relações diretas com o grau de erodibilidade das áreas. Corroboram os estudos de Mattos *et al* (2002) e Jiménez-Rueda *et al*. (2006), onde a distribuição espacial das classes de erodibilidade, por si só, mostra que os processos erosivos em todos os estágios, desde os iniciais (laminares ou superficiais), até os mais avançados de voçorocamento profundo, obedecendo a uma geometria de instalação e evolução associadas a sistemas de fraturamentos.

5. CONCLUSÃO

A elaboração do mapa do potencial natural de erodibilidade, a partir da aplicação da sistemática morfoestrutural e morfotectônica e o uso de técnicas de geoprocessamento, é adequada a estudos que visam o planejamento e gestão do meio físico, pois compreende uma sistemática de trabalho relativamente rápida e de baixo custo, onde estabelece com boa precisão classes de potencial natural de erodibilidade (preferencialmente em mapeamentos em escala de reconhecimento), permitindo que planejadores e tomadores de decisão focalizem os estudos detalhados em áreas previamente estabelecidas, o que permite reduzir os custos totais de implantação e manutenção de obras lineares, entre elas as dutovias.

No caso da faixa do Gasoduto Bolívia-Brasil contida na área de estudo, obra já implantada, observou-se uma relação satisfatória entre as áreas mais apropriadas à implantação *versus* a efetiva implantação da obra, onde boa parte da obra se localiza em áreas com muito baixo e baixo PNE, com exceção de áreas onde um possível desvio seria financeiramente inviável. Essas áreas devem ser constantemente monitoradas e fatalmente os custos de manutenção serão relativamente maiores.

A elaboração e manipulação dos diferentes dados em ambiente SIG possibilita o melhor gerenciamento, cruzamento e análise dos mesmos, facilitando a comparação com dados pré-existentes ou dados que serão futuramente formulados. Como já mencionado anteriormente, este estudo faz parte de um estudo mais amplo, onde serão analisados outros parâmetros do meio físico (litologia, geomorfologia, coberturas de alteração intempérica e solos) que possibilitarão dimensionar com maior confiabilidade o potencial natural de erodibilidade, assim como a capacidade de suporte da área frente à implantação de obras lineares.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento do projeto “Zoneamento geoambiental como subsídio a implantação e gestão de obras lineares”, bolsa de Iniciação Científica (processo 06/52522-7).

7. REFERÊNCIAS

• Artigo em Periódico

- JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; NUNES, E.; MATTOS, J.T. Caracterização fisiográfica e morfoestrutural da folha São José de Mipibu - RN. **Geociências**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 481-491, 1993.
- MADRUCCI, V; ARAÚJO, C.C.; TAIOLI, F. Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33 (2), p.43-52, jun 2003.

OHARA, T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; MATTOS, J.T. de; CAETANO, N.R. Zoneamento geoambiental da região do alto-médio rio Paraíba do Sul e a carta de aptidão física para a implantação de obras viárias. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 173-182, jun. 2003.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícias Geomorfológicas**. Campinas, v. 6, n.32, 1976, p.71-104.

- **Artigo em Eventos**

GUY, M. Quelques principes e quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation. IN: Symposium International de Photo-Interpretation, 2, 1966, Paris. **II Symposium International de Photo-Interpretation: Acte**, 1966, v.1, p.21-41.

JIMENEZ-RUEDA, J.R.; MATTOS, J.T. MALAGUTTI FILHO, W. Estudos integrados para controlar impactos ambientais de um sistema de irrigofertilização com vinhoto na região centro-leste do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCION REMOTA, 4., 1989a, Bariloche: **Anais...** Bariloche, 1989^a, v.2, p. 459-465.

JIMÉNEZ-RUEDA, J. R.; PESSOTTI, J. E. S.; MATTOS, J. T. Uso de sensoriamento remoto no zoneamento agroecológico da região da serra do mar no Estado e São Paulo. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCION REMOTA, 4., 1989b, Bariloche: **Anais...** Bariloche, 1989b, v.1, p. 135-139.

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; MATTOS, J.T.; OHARA, T.; CRISOSTOMO-NETO, A.P. Proposta Metodológica para determinar o potencial de erodibilidade a partir da análise tectônica em sensores remotos. In: Simpósio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geografía, n. 12, 2006, Cartagena. **Anais: XII Simpósio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica**, 2006.

MATTOS, J.T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; OHARA, T.; MENDES, M.L. de B.; SANTANA, M.A. Critérios para mapeamento de classes a erosão de solos em imagem TM-Landsat. In: Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota, n. 9, 2002, Cochabamba. **Anais IX Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota**. Cochabamba: SELPER, 2002.

O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D.; POHN, H.A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geol. Soc. of Am. Bul.**, n. 87, p. 1463-1469, 1976.

SOARES P.C., LUZ M.E.R., REDAELLI R., GUERRA S.M.S. Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na bacia do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2, 1982, São José. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 1, p.157-168.

- **Livro ou Monografia**

BELLIA, V.; BIDONE, E.D. **Rodovias, Recursos Naturais e Meio Ambiente**. 1 ed. Niterói-RJ : Editora Universitária Universidade Federal Fluminense (EDUFF) e Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), 1992.

BONHAM-CARTER, G.F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: modelling with GIS**. Pergamon: Oxford, 1994.

DAITX, E.C.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; MATTOS, J.T.; CAETANO, N.R.; MOURA, C.A.; COELHO, J.O.M.; PUPIM, F.N. **Mapa pedológico do Gasoduto Bolívia-Brasil**. Rio Claro, Relatório Final (contrato TBG/FUNDUNESP nº 4500007262), 2005.

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. **Caracterização das coberturas de alteração intempéricas e suas múltiplas aplicações na região centro oeste do Estado de São Paulo**. Rio Claro, Relatório Final de projeto auxílio a pesquisa FAPESP (nº 89/3495-0), 1993.

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; MATTOS, J.T. **Levantamentos geoambientais e suas aplicações múltiplas: especificações e procedimentos**. Rio Claro-SP: Pós-graduação em Geociências e Ciências Exatas, 1992. (notas de aula)

LOCZY, L.; LDEIRA, E.A. **Geologia estrutura e introdução à geotectônica**. Ed. Edgard Blucher, Rio de Janeiro, CNPq, 1980, 134p.

MATTOS J.T.; BALIEIRO M.G.; SOARES P.C.; BARCELLOS P.E.; MENESES P.R.; CSORDAS S.M. **Análise morfoestrutural com uso de imagens MSS-Landsat e radar para pesquisa de hidrocarbonetos no estado de São Paulo**. São José dos Campos, INPE, RTR/015, 1982, 167p.

MCCOY, J.; JOHNSTON, K. **Using ArcGis Spatial Analyst**. New York, ESRI, 2002, 232 p.

RIVEREAU, J.C. Curso de fotointerpretação: notas de aulas. **Série Didática**. Brasília, Departamento de Geociências - UNB, n. 4, 1972, 128p.

VENEZIANI, P.; ANJOS, C.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia**. São José dos Campos, INPE, 1982, 54p.

- **Capítulo de Livro**

FELGUEIRAS, C.A. Modelagem numérica do terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à ciência da geoinformação**. On line 2004. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>> acesso em 30nov.2006.

• **Tese ou Dissertação**

CAETANO, N.R. **Procedimentos metodológicos para o planejamento de obras e usos: uma abordagem geotécnica e geoambiental**. 2006, 163. f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Orientador: Mattos, J.T. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

FRANZONI, A.M.B. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento na caracterização do meio físico para fins de traçado e manutenção de rede viária. Ilha DE Santa Catarina – SC**. 2000. 132 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Orientador: Mattos, J.T. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

MELO, M.S. **A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação cenozóica na depressão periférica paulista**. 1995. 144 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

RODRIGUES, R.M. **Estudo e caracterização do meio físico da bacia do Rio Camboriú/SC, visando zoneamento geoambiental**. 2000, 73 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Orientador: Mattos, J.T. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

CARACTERIZATION OF THE NATURAL POTENTIAL OF ERODIBILITY THROUGH THE MORPHOSTRUCTURAL AND MORPHOTECTONIC SYSTEMATIC APPLIED TO LINEAR FACILITIES - PIPELINES

Abstract: The objective of the work is to characterize susceptibility areas to erosion, at São Carlos region, Brazil and take into consideration the natural potential of erodibility through the morphostructural and morphotectonic systematic. This systematic is based on the deformational process of the massives, represented by tectonic fault systems. The analysis of these features point out interferences about permeability infiltration and major faults of the region. These informations generate important conditions to define the erosion intensity. These analyses were made from the Digital Terrain Model, creating a morphostructural map and the fracture map (by the lines of strikes and tectonics lineaments). These products are then processed and integrated at a Geographic Information System (GIS), using statistic methods and multicriterial analysis, to obtain a map of natural potential erodibility, that can assist at the introduction, planning and management of linear facilities, as pipelines.

Keywords: Erosion, Linear Facilities, Planning.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.