

CONFEÇÃO DO MAPA DE DENSIDADE DE DRENAGEM ATRAVÉS DE GEOTECNOLOGIAS VISANDO DEFINIR A VULNERABILIDADE AOS PROCESSOS EROSIVOS NA SUB-BACIA DO BAIXO PIRACICABA (SP)

Paulo Sérgio de Rezende Nascimento¹

Reinaldo Antônio Petta²

Gilberto José Garcia³

Resumo

O objetivo deste trabalho foi realizar um mapa de densidade de drenagem através de técnicas de sensoriamento remoto e krigagem, definindo assim áreas vulneráveis aos processos erosivos da Sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP). O presente trabalho utilizou os seguintes procedimentos: método fotointerpretativo de imagens de satélite, método geoestatístico de krigagem e processamento digital de imagens para obter o mapa temático de interesse. De acordo com o resultado obtido, identificaram-se quatro diferentes áreas de vulnerabilidade à erosão representadas pelas classes de densidade de drenagem alta, medianamente alta, medianamente baixa e baixa. Concluiu-se que a área é heterogênea, com regiões sujeitas a diferentes intensidades de processos erosivos.

Palavras-chave: krigagem, sensoriamento remoto, densidade de drenagem.

Abstract

CONFECCION OF THE DRAINAGE DENSITY MAP THROUGH OF GEOTECHNOLOGIES SEARCHING FOR DEFINITION OF THE VULNERABILITY THE EROSIVES PROCESSES OF THE SUB-BASIN OF THE LOW PIRACICABA RIVER (SP)

This work aims to accomplish a map of the density of drainage through techniques of remote sensing and kriging. Hence, vulnerable areas toward the erosive processes of the Sub-basin of the Low Piracicaba River (SP) have been defined. The present work employs the following procedures: the visual interpretation method of satellite images, the geostatistician method of kriging and digital processing of images to obtain the thematic map of interest. Such data indicated that four different areas of vulnerability, represented by classes of density of drainage, identified high, medium high, medium low and low density. The findings revealed that the area is heterogeneous, with regions of different intensities of erosive processes.

Key-words: kriging, remote sensing, drainage density.

¹ LAGEOMA - Laboratório de Geomática, Departamento de Geologia-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário - Natal - RN, paulo@geologia.ufrn.br

² LAGEOMA - Laboratório de Geomática, Departamento de Geologia-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário - Natal - RN, petta@geologia.ufrn.br

³ CEAPLA - Universidade Estadual Paulista, Av. 24 A, 1515, Rio Claro-SP, gilberto@rc.unesp.br

INTRODUÇÃO

Existem vários critérios metodológicos com o intuito de compartimentar o potencial erosivo de uma determinada região, dentre eles, a utilização de processos sistemáticos de interpretação visual de imagens de satélites, pela análise das diversas propriedades da rede de drenagem. Estas propriedades são definidas em função do grau de persistência de uma ou mais das propriedades da rede de drenagem (VENEZIANI e ANJOS, 1982), que podem ser agrupadas de acordo com a sua densidade. Aliada à fotointerpretação, a geoestatística é uma importante ferramenta na elaboração de mapas de contornos, os quais mostram linhas que representam medidas interpoladas com iguais valores (LANDIM, 2006), sendo, então, um procedimento estatístico capaz de gerar o mapa de densidade de drenagem.

A rede de drenagem se constitui em um importante indicador de alterações ocorridas na composição da paisagem de bacias hidrográficas, seja por mudanças na sua estruturação, forma ou por perda ou ganho de canais (COLLARES, 2000), e indica o grau de dissecação da superfície. Para cada ambiente, os sistemas hidrográficos dependem principalmente das proporções de infiltração e deflúvio, considerando, no entanto, a resistência à erosão o mais importante fator e que, em períodos relativamente longos, exerce o efeito dominante no desenvolvimento dos sistemas hidrográficos e das bacias de drenagem (PIEIDADE e GARCIA, 1981). Desta forma, nas rochas onde a infiltração é mais dificultada há maior escoamento superficial, gerando possibilidades para esculturação de canais permanentes e consecutiva densidade de drenagem alta (CHRISTOFOLETTI, 1979; 1981). Além da geologia, outros fatores do meio físico podem influenciar na densidade de drenagem em uma bacia hidrográfica, tais como: topografia, clima, solo, relevo, declividade e vegetação. Dentre os fatores antrópicos, apenas a urbanização e a agricultura são capazes de provocar alterações consideráveis na densidade de drenagem (COLLARES, 2000).

A Sub-bacia Hidrográfica do Baixo Piracicaba (SP) apresenta-se heterogênea com relação aos aspectos tectônicos e processos superficiais, com regiões sujeitas a diferentes intensidades de processos erosivos e com *trends* regionais, principalmente, nas direções NE-SW e NW-SE, seguidos das direções N-S e E-W. Este quadro define o modelo mais apropriado para entender a dinâmica da paisagem desta sub-bacia, que é tectono-erosivo (NASCIMENTO, 2004). Aliada a esta dinâmica, ressaltasse a atividade antrópica como também responsável pela evolução da paisagem, tanto pela criação e expansão de centros urbanos quanto pelos empreendimentos rurais.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é compartimentar a Sub-bacia do Baixo Piracicaba em regiões fisiográficas homogêneas quanto ao grau de densidade de drenagem, definindo assim, áreas distintas quanto à vulnerabilidade à erosão através de técnicas de fotointerpretação, de processamento digital de imagens e de métodos geoestatísticos (krigagem ordinária). Como suporte a esta análise foram utilizadas informações complementares: tipos de rochas, de relevos, de solos, de classes de declividade, vegetação e uso da terra.

A geoestatística envolve análise e inferência de fenômeno espaço-temporal para avaliar e inferir valores de uma variável distribuída no espaço e ou no tempo e seu alicerce está fundamentado na Teoria das Variáveis Regionalizadas (CAMARGO et al., 2005). No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas há duas ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: o semivariograma e

A geologia é representada pelas rochas dos grupos Passa Dois (Formação Corumbataí), São Bento (formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) e Coberturas Cenozóicas (Formação Itaqueri e Aluviões Arenosos). As litologias que ocorrem na área de estudo representam uma significativa parte da evolução da Bacia Sedimentar do Paraná, assim a Formação Corumbataí demarca o final do estágio regressivo no Permiano. A depressão deixada por esse mar, o qual não mais retornou, foi preenchida pelos sedimentos das formações Pirambóia e Botucatu (Triássico e Jurássico). A Formação Serra Geral, com até quase 2.000 m de lavas, representa a maior manifestação basáltica do planeta (Neojurássico-Eocretáceo) e por fim, têm-se a Formação Itaqueri (Eoceno) e os aluviões (Quaternário), que cobrem porções das rochas mais antigas (Figura 2).

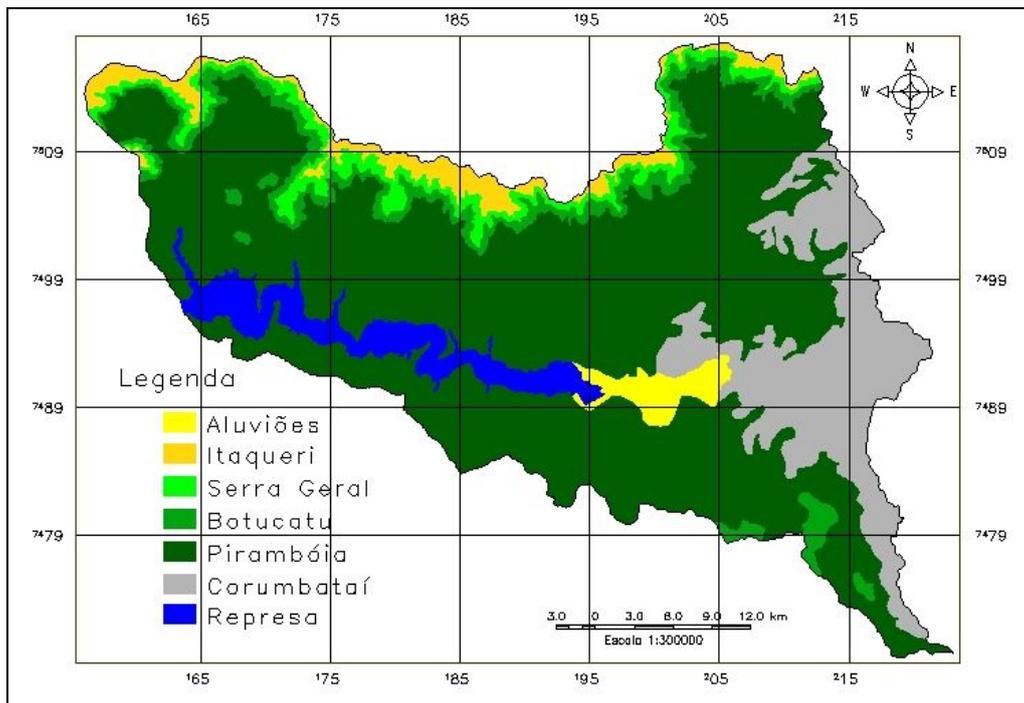


Figura 2. Mapa geológico da área de estudo. FONTE: Adaptado de segundo Almeida et al. (1981).

As formações geológicas estão embutidas nas províncias geomorfológicas denominadas de Depressão Periférica e Cuesta Basáltica, as quais foram esculpidas pelo processo de aplainamento da Superfície de Aplainamento Japi (ALMEIDA, 1964) e apresentam formas geomorfológicas de acumulação de planície fluvial e de dissecação convexas e tabulares (Figura 3). Na Figura 4 podem ser vistos os tipos de solos: NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico A Moderado (RQ-1), GLEISSOLO TIOMÓRFICO Húmico (GT-1), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico Típico textura média a moderado (PVA-1), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico Típico Textura média ou areno-média A moderado (PVA-2), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alissólico Textura arenosa/argilosa ou média/argilosa a moderado (PVA-3), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico Típico textura média + NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico A Moderado (LVA-1 + RQ-1) e LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico Típico Textura média A moderado (LVA-1).

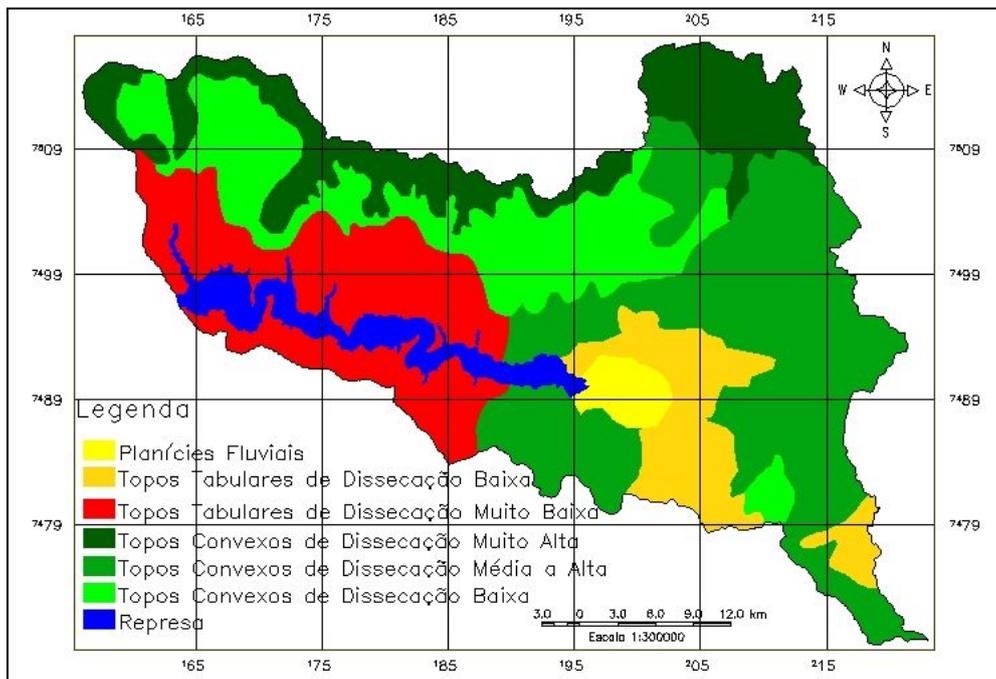


Figura 3. Mapa geomorfológico da área de estudo. FONTE: Adaptado de Ross e Moroz (1997).

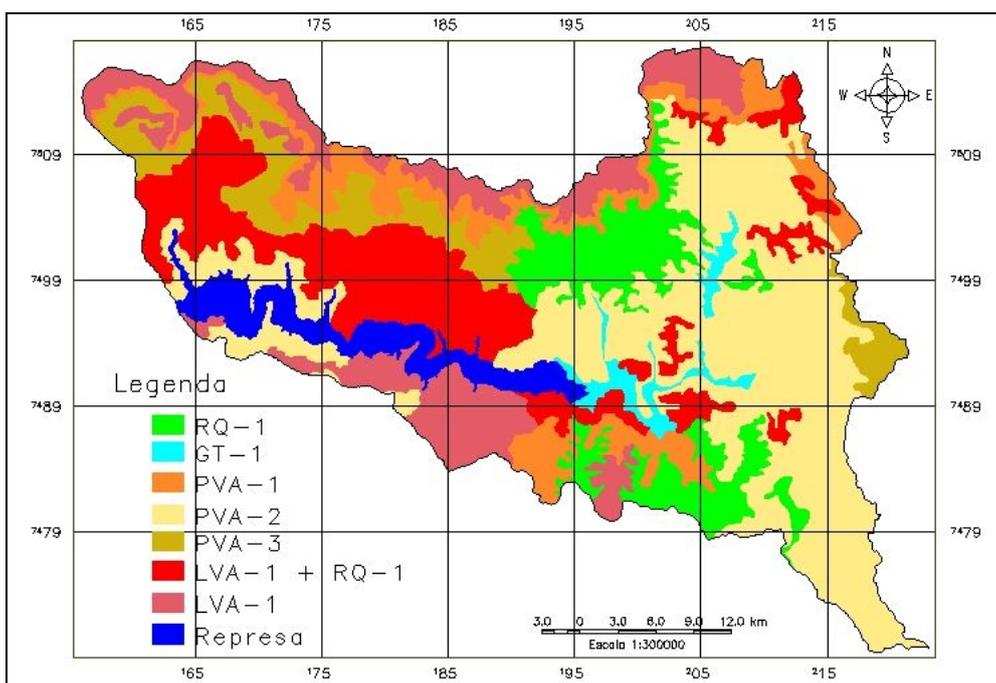


Figura 4. Mapa pedológico da área de estudo. FONTE: Adaptado de Oliveira et al. (1999).

A cobertura vegetal é constituída por Vegetação de Várzea, Mata, Capoeira e Cerrado e as categorias de uso da terra são compostas principalmente por Cana-de-açúcar e Pastagem e secundariamente por Culturas Perenes (café e fruticultura) e Culturas Anuais (hortigranjeiras), as quais foram mapeadas pela de interpretação visual de imagens de satélites, auxiliados por trabalho de campo por Nascimento e Garcia (2004a) e podem ser vistos na Figura 5. O mapa de declividade possui as seguintes classes de declividade: menor que 2%, 2 a 5%, 5 a 10%, 10 a 20%, 20 a

30%, 30 a 50% e maior ou igual que 50% (Figura 6), o qual foi confeccionado automaticamente por Nascimento e Garcia (2004b).

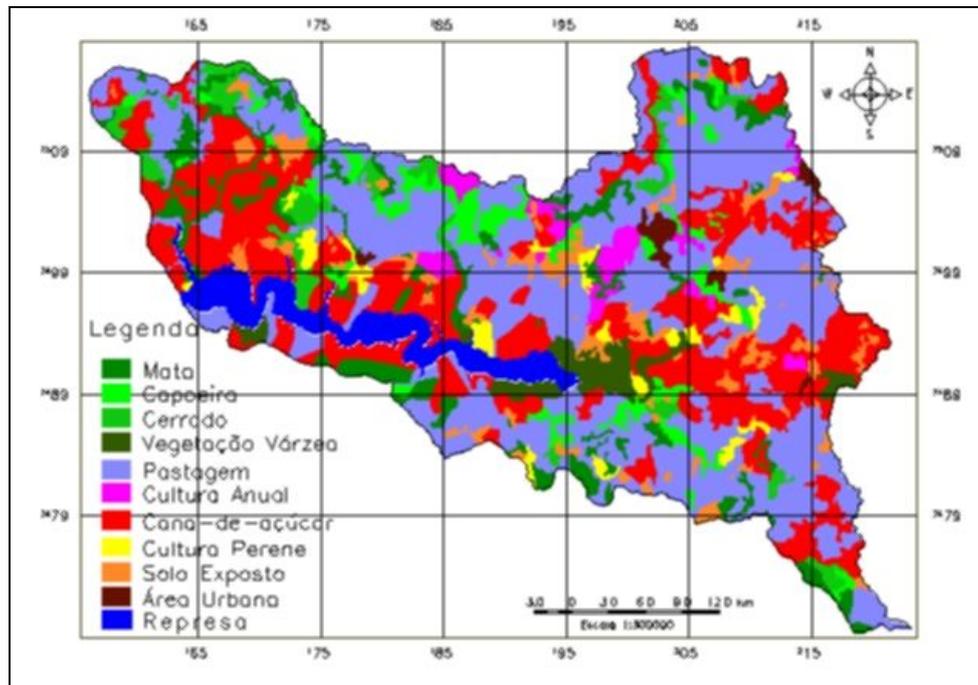


Figura 5. Mapa de vegetação e uso da terra da área de estudo. FONTE: Nascimento e Garcia (2004a).

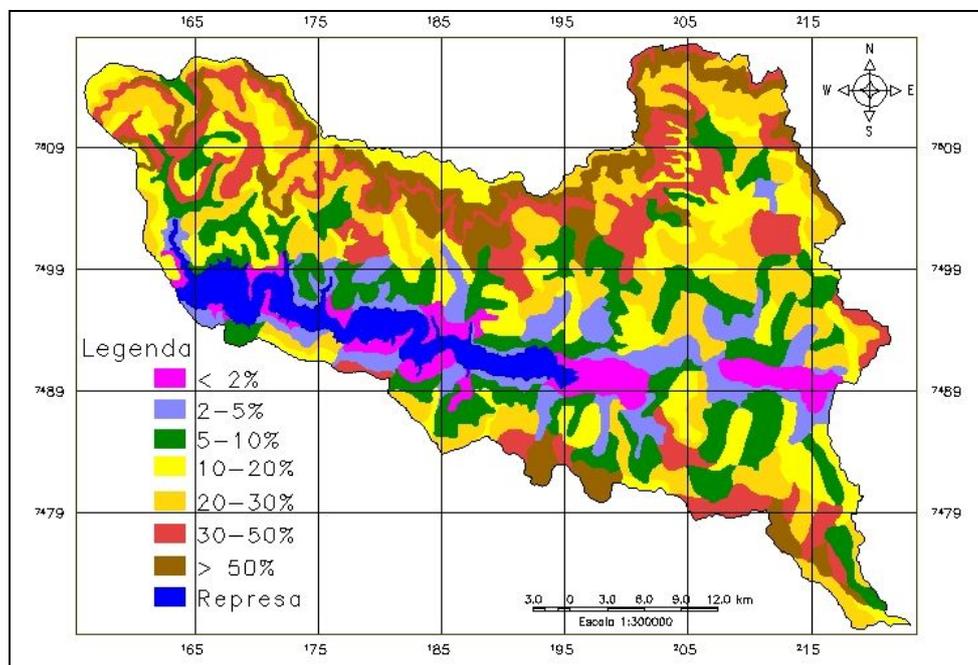


Figura 6. Mapa de classes de declividade da área de estudo. FONTE: Nascimento e Garcia (2004b).

MATERIAL E MÉTODO

Os materiais utilizados para a confecção do mapa de densidade de drenagem foram as cartas topográficas do IBGE escala 1:50.000, correspondentes às folhas de Dois Córregos, Brotas, Itirapina, Piracicaba, Capivari, Laras, São Pedro, Barra Bonita e Santa Maria da Serra; imagem TM/Landsat-5 multiespectral e o programa computacional de geoprocessamento SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas).

As etapas de operacionalização realizadas para atingir o objetivo deste trabalho corresponderam: extração da rede de drenagem pelo método de interpretação visual de imagens, geração da imagem interpolada em nível de cinza da densidade de drenagem pelo método geoestatístico de krigagem ordinária e processamento digital desta imagens por fatiamento, gerando a imagem interpolada colorida e equalização de histograma, produzindo as classes de densidade de drenagem.

OBTENÇÃO DAS REDES DE DRENAGEM

O procedimento metodológico adotado para a extração da rede de drenagem foi a fotoleitura, baseado no processo sistemático e lógico de fotointerpretação de fotos áreas e de imagens de satélites desenvolvido e divulgado por Soares e Fiori (1976) e Veneziani e Anjos (1982), respectivamente. Desta forma, o primeiro passo foi a importação da rede drenagem das cartas topográficas, que já se encontram no formato DXF, para o Banco de Dado Georreferenciado do SPRING. No próprio monitor, a rede de drenagem foi complementada ora utilizando a banda 4 ora a 5 ora a 7 das imagens TM-Landsat, juntamente o arquivo digital das isoipsas.

KRIGAGEM ORDINÁRIA

O primeiro passo foi a conversão da carta da rede de drenagem que se encontrava no formato vetorial para o matricial, pois o SPRING leva em consideração o número de pixels de cada drenagem e não o seu comprimento vetorial. A dimensão média e a distribuição das drenagens permitiram que a área fosse dividida em células de 4.000 x 4.000 metros, que serviu para armazenar a densidade de drenagem. Neste procedimento foram utilizados os operadores de álgebras de mapas Conte e Média Zonal, os quais contam o número de pixels de cada drenagem e inserem na tabela de objetos a média do número de pixels em cada célula (parâmetro Z estimado). Estimado o parâmetro Z, os dados foram avaliados por procedimentos de análise estatística descritiva, para visualizar o comportamento geral dos dados e identificar possíveis valores discrepantes, através das medidas de localização, de dispersão e de forma (COSTA NETO, 1977), visando melhorar a eficiência do procedimento geoestatístico (ALVES, 1987).

O próximo procedimento foi a análise do semivariograma, que compreende: levantamento do semivariograma experimental; ajuste a uma família de modelos de semivariogramas e validação do modelo a ser utilizado nos procedimentos da krigagem e por fim, a aplicação da krigagem ordinária, propriamente dita. Deste modo, gerou-se um semivariograma omnidirecional para maximizar o número de pares em cada intervalo de distância, para produzir um variograma mais suavizado. Em seguida, realizou-se a análise por superfície do semivariograma omnidirecional, visando verificar a ocorrência ou não de uma anisotropia. É importante que o semivariograma tenha uma aparência mais próxima de um modelo teórico (esférico,

exponencial, gaussiano ou potência). Isto garante que o ajuste seja mais representativo e assim, as estimativas obtidas a partir da krigagem sejam mais exatas e, portanto, mais confiáveis. O ajuste do semivariograma ao modelo teórico estima os valores do efeito pepita, a contribuição e o alcance para um determinado modelo. É imprescindível testar todos os modelos para verificar o melhor ajuste, que é definido pelo menor valor de Akaike. Então, verifica-se a validação do modelo através do histograma dos valores observados e estimados e do diagrama e estatística do erro; e por fim, realiza-se a krigagem, propriamente dita.

FATIAMENTO E EQUALIZAÇÃO DO HISTOGRAMA

Como as variações de cores são mais visíveis ao olho humano do que as variações em NC realizou-se um fatiamento, que é um aumento de contraste, cuja operação consiste em realçar os pixels cujas intensidades situam-se dentro de um intervalo específico (fatia), isto é, entre um mínimo e máximo. No SPRING, o fatiamento é feito de modo interativo, onde o usuário define o tipo de fatiamento e o número de fatias. O tipo de fatiamento escolhido foi o arco-iris, o qual segue a seqüência do arco-iris, como o próprio nome já indica, e o número de fatias definido foi quatro.

A equalização do histograma é uma manipulação do histograma de forma que as classes ou fatias não necessitam ter os mesmos intervalos, pois as mesmas são definidas pela freqüência dos níveis de intensidade. Este procedimento, juntamente com o fatiamento por arco-iris e com o resultado da krigagem com representação em NC, foi possível separar de forma objetiva quatro classes de densidade de drenagens. Estas quatro classes possuem o valor interpolado Z o qual varia de 1.023 a 4.851 e as classes de baixa densidade possuem valores entre 1.023 a 2.446, a medianamente baixa entre 2.446 a 3.201, a medianamente alta, 3.201 e 4.062 e por fim a classe de alta densidade de drenagem, entre 4.062 e 4.851.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

GERAÇÃO E AJUSTES DOS SEMIVARIOGRAMAS

Inicialmente, gerou-se um semivariograma omnidirecional para maximizar o número de pares em cada intervalo de distâncias, produzindo um variograma mais suavizado. Pela avaliação do semiograma omnidirecional por análise de superfície constatou-se uma maior variação anisotrópica na direção de 26 graus e uma menor, na direção ortogonal (116 graus). Desta forma, foram realizadas as análises do semivariograma nestas duas direções. Para confirmar esta anisotropia confrontou-se o semivariograma unidirecional das duas direções de maior e menor variabilidade espacial com o variograma omnidirecional, representadas pelas cores verdes, azul e vermelha, respectivamente (Figura 7). Constatou-se que na direção 26° os valores aumentam muito mais rapidamente, sugerindo maior continuidade na direção 116.

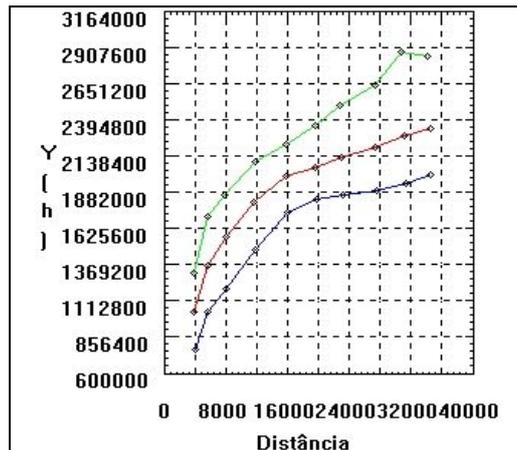


Figura 7 - Semivariograma anisotrópico por análise unidirecional para os pontos amostrais da densidade de drenagem nas direções 0 (vermelho), 26 (verde) e 116 (azul) graus.

Os ajustes dos semivariogramas de acordo com os modelos esférico, exponencial, potência e gaussiano resultaram nos seguintes Akaike, respectivamente: -60, -75, -41 e -60. O melhor ajuste foi realizado pelo modelo exponencial, pois apresentou o menor valor de Akaike e também foram obtidos os valores de efeito pepita C_0 , a contribuição C e o alcance, a saber: 281.648; 2.005.975 e 24.705, respectivamente. Definido os parâmetros dos modelos exponenciais nas duas direções, observou-se que se trata de uma anisotropia combinada, assim definiu-se um único modelo de anisotropia.

MODELAGEM DA ANISOTROPIA E KRIGAGEM ORDINÁRIA

Pelos valores obtidos no ajuste dos modelos, para a anisotropia observada, tem-se tipicamente uma anisotropia combinada, que é refletida por diferentes patamares, alcances e efeitos pepitas, porém do mesmo modelo esponencial. A modelagem da anisotropia consistiu então em dividir o semivariograma em faixas, onde cada faixa foi modelada como uma anisotropia geométrica (Figura 8). Uma vez estabelecido de forma conveniente as faixas, a anisotropia foi decomposta graficamente de modo que, cada parcela represente a anisotropia geométrica (Figura 9).

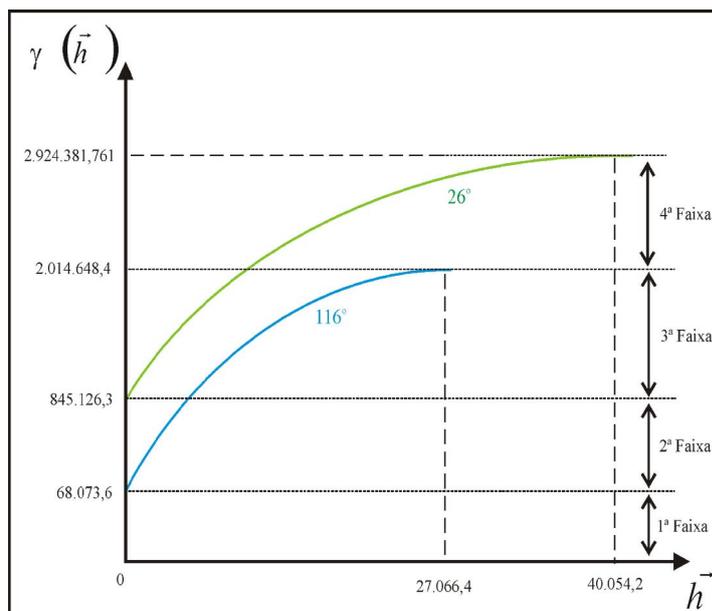


Figura 8 – Esquema gráfico da anisotropia combinada.

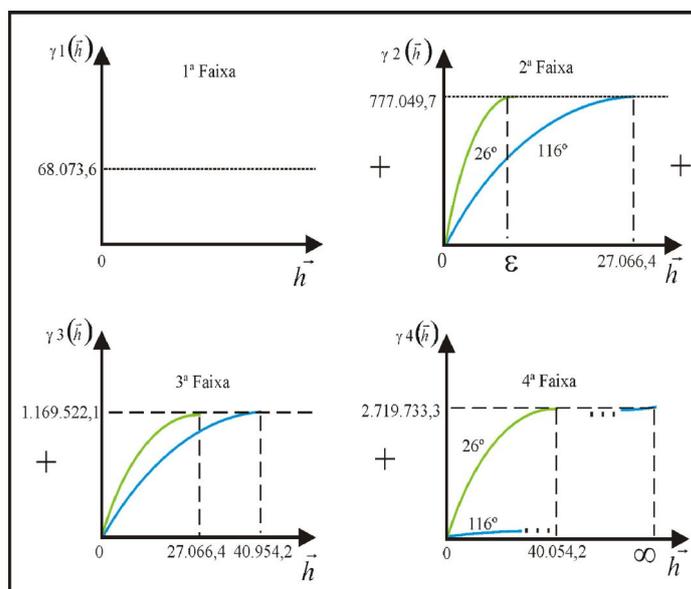


Figura 9 – Esquema da decomposição da anisotropia combinada em anisotropias geométricas.

Desta forma, pode-se concluir que a primeira faixa refere-se a um valor constante, com efeito pepita $C_0 = 68.073,591$ e seu modelo relativo foi: $\gamma_1(h) = 68.073,591$. Para estabelecer a anisotropia geométrica na segunda faixa utilizou-se de um artifício, que consistiu em empregar um modelo exponencial com alcance muito pequeno (ε). Isto foi necessário para modelar o efeito pepita (845.126,328) relativo à direção de 26° . Com relação a direção de 116° , observou-se que a parte do modelo exponencial participa com uma pequena contribuição. Desta forma, a anisotropia geométrica é caracterizada em ambas as direções com contribuição de 777.052,737 (845.126,328 – 68.073,591), alcance (ε) para a direção de 26° e alcance de 27.664,379 m para a direção 116° . Portanto, o modelo único e consistente de semivariograma para esta faixa foi: $\gamma_2(h) = 777.052,737 \{Exp [(h_{26^\circ}/\varepsilon)^2 + (h_{116^\circ}/27.064,379)^2]^{1/2}$. Na terceira faixa, a anisotropia geométrica foi obtida de

forma direta, o que significa, que ambos modelos contribuem para a caracterização da anisotropia, com alcance de 27.066,379 para o a direção 116° e 40.054,166 para 26°, com contribuição de 1.169.522,286 (2.014.648,414- 845.126,328). Assim, o modelo único e consistente de semivariograma foi: $\gamma_3(h) = 1.169.522,286 \{Exp [(h_{26^\circ}/40.054,166)^2 + (h_{116^\circ}/27.064,379)^2]^{1/2}$. Para estabelecer a anisotropia geométrica da quarta faixa empregou-se outro artifício, pois não existe um modelo associado à direção 116°. Então, atribui-se um alcance muito grande (∞) a esta direção. O resultado foi uma estrutura exponencial com alcance de 40.054,166 m na direção 116° e ∞ na direção 26° e uma contribuição de 909.733,347. Desta forma: $\gamma_4(h) = 909.733,347 \{Exp [(h_{26^\circ}/40.054,166)^2 + (h_{116^\circ}/\infty)^2]^{1/2}$. Finalmente, o modelo completo e consistente para qualquer distância e direção do vetor h, resume-se na soma $\gamma(h) = \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \gamma_3(h) + \gamma_4(h)$.

Após ter gerado o modelo de ajuste para a anisotropia, fez-se a validação deste, pois sempre existe um certo grau de incerteza sobre os parâmetros utilizados. Para tal foram gerados os produtos mostrados na Figura 10.

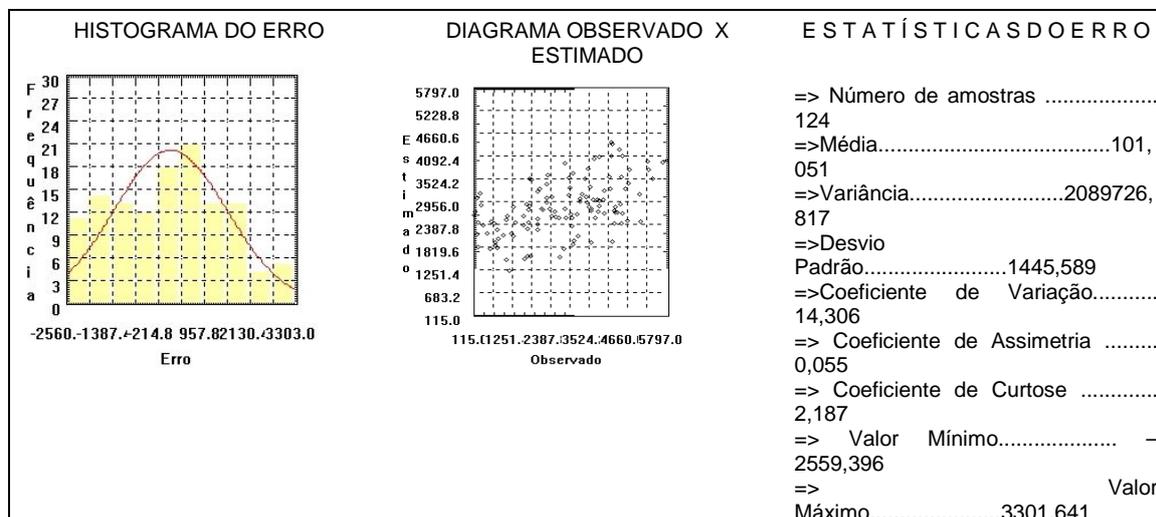


Figura 10 – Validação do modelo de ajuste do semivariograma anisotrópico.

Como pode ser visto pelo histograma do erro, há grande semelhança com uma distribuição normal; o diagrama observado e estimado se apresenta razoavelmente alinhados na direção de 45°, o que indica uma análise análoga, porém com alguns pontos dispersos; e por fim as estatísticas do erro, o valor da assimetria é muito baixo (próximo de zero), o que indica uma boa simetria; o pequeno achatamento mostra uma distribuição platicúrtica (menor que 3) e os altos valores da variância, do seu coeficiente de variação e do desvio padrão representam a grande heterogeneidade da distribuição das drenagens na área de estudo, o que influencia diretamente no valor da média, a qual não é próxima da média entre os valores mínimo e máximo. A partir dos parâmetros definidos para compor o modelo anisotrópico (exponencial) das equações supracitadas e dos parâmetros exposto na Figura 10, executou-se a krigagem ordinária, gerando a superfície interpolada em NC (Figura 11), onde os tons de cinza mais claros representam alta densidade de drenagem e os mais escuros, baixa densidade de drenagem, claramente visível pela rede de drenagem sobreposta.



Figura 10 – Parâmetros da krigagem ordinária.

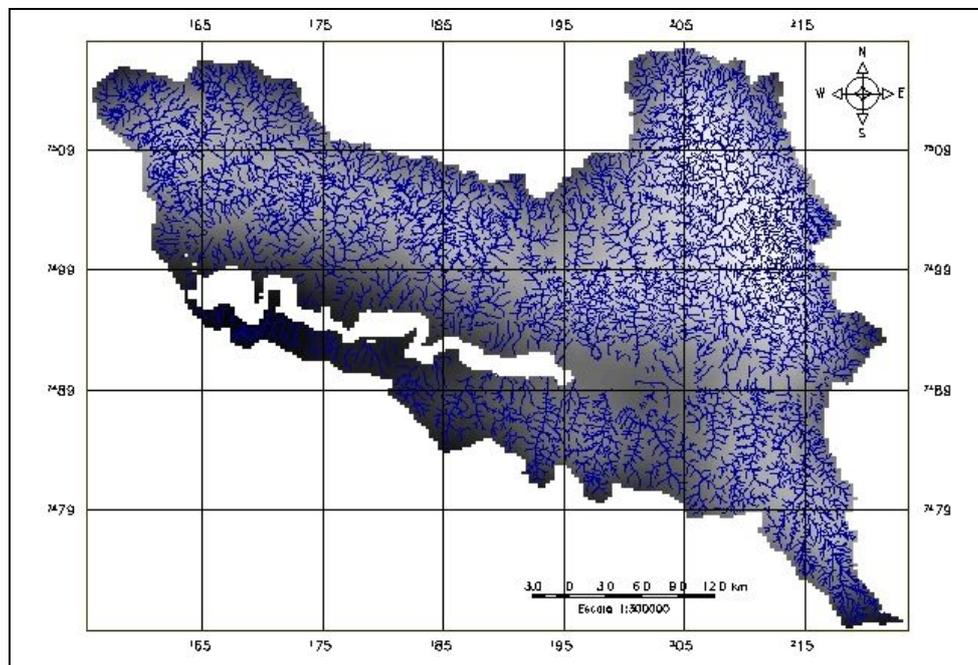


Figura 11. Imagem em NC interpolada representativa da densidade de drenagem e a rede de drenagem.

PROCESSAMENTO DA IMAGEM INTERPOLADA

Na Figura 12, pode-se ser observado o mapa de densidade de drenagem após o processamento de fatiamento por arco-íris. As cores azulada-esverdeadas representam as classes de baixa densidade de drenagem, em oposição às cores alaranjada-vermelhadas, as quais exibem as classes de alta densidade de drenagem. É importante notar, que ao comparar os produtos das figuras 11 e 12, esta última apresenta maior nitidez, pois nossa visão é muito mais sensível às tonalidades de cores do que aos tons de níveis de cinza.

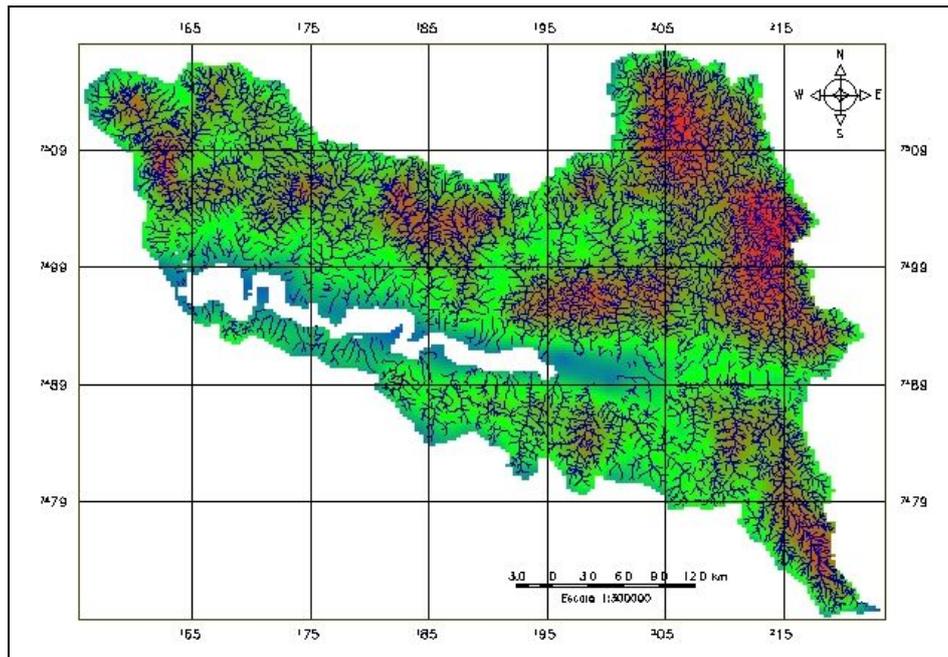


Figura 12 – Imagem interpolada colorida representativa da densidade de drenagem e a rede de drenagem.

A Figura 13 exibe o mapa de densidade de drenagem gerado pela equalização do histograma. Este mapa representa as áreas de diferentes concentrações de drenagens, o que indica a capacidade de dissecação do relevo.

Sem levar em consideração a área da Represa de Barra Bonita, a sub-bacia apresenta 1.461 km² de área, a classe de alta densidade de drenagem possui 224 km² (15%); a medianamente alta, 627 km² (43%); a medianamente baixa, 401 km² (28%) e a baixa 209, km² (14%). Nas classes de alta e medianamente alta densidade de drenagem, os processos erosivos estão em estágios avançados, representados por ravina e boçorocas, facilmente verificadas em campo. Na classe medianamente baixa, as feições erosiva dominantes são os sulcos e raras ravinas e/ou pequenas boçorocas. A classe de baixa densidade de drenagem apresenta depósitos de sedimentos com feições erosivas que indicam um grande aporte de sedimentos, que são carreados para os canais fluviais, causando o assoreamento.

Este resultado é decorrente, além das características abióticas e bióticas, da apropriação da área a que foi submetida ao longo de sua história. A apropriação se deu através do desmatamento acelerado e descompromissado com os princípios básicos de proteção do solo, dos tipos de culturas, principalmente (pastagem e cana-de-açúcar) e da preparação do solo para o plantio deixando-o exposto e modificando o trajeto original dos canais fluviais e até mesmo eliminando-os. As áreas com pastagens e cana-de-açúcar ocupam ambientes inapropriados, principalmente, as regiões das planícies de inundação e das encostas das serras de Itaqueri e São Pedro (Cuesta Basática), com declividades maiores que 30%. Fato este que infringe o Artigo 2º da Lei 4.771 de 15 de setembro de 1965, do Código Florestal, modificado pela Lei 7.803 de 18 de julho de 1989. Neste contexto, é recomendável então, a recomposição da mata ciliar e o reflorestamento das encostas das serras.

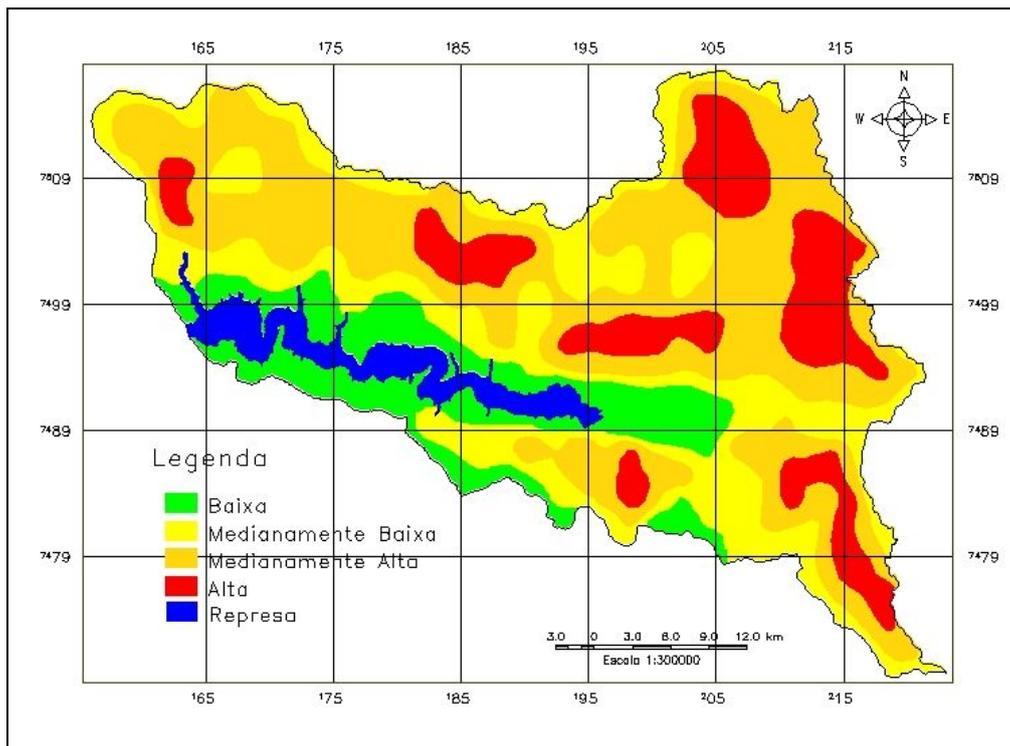


Figura 13 – Mapa de densidade de drenagem da área de estudo.

A realidade da ocupação da área de estudo é adversa aos princípios de um desenvolvimento econômico sustentável, pois a apropriação do território pela atividade rural está inadequada com a capacidade do ambiente em sustentar esta atividade em várias porções da sub-bacia, causando processos de erosão e de assoreamento. É importante ressaltar que, o mapa de densidade de drenagem representa uma importante ferramenta tecno-gerencial para priorização dos ambientes a serem protegidos e auxiliam no direcionamento dos recursos disponíveis para a recuperação e/ou minimização da degradação do terreno oriundo dos processos erosivos e de assoreamento. Como a agricultura é um dos principais agentes propulsores do desenvolvimento dos municípios da sub-bacia, a implementação de um plano de gestão ambiental, em que a agricultura seja prioridade constitui o caminho a percorrer para o desenvolvimento econômico e social da região.

As características bióticas e abióticas e do uso da terra de cada classe de densidade de drenagem estão sintetizadas na TABELA 1. De acordo com as características da tabela, as áreas da classe de densidade alta e medianamente alta apresentam uma alta vulnerabilidade à erosão, destacando as altas declividades, as formas de relevo, o arenito Pirambóia (localizada na Depressão Periférica). Em oposição, apesar da pequena declividade da classe de baixa densidade de drenagem, os sedimentos aluvionares e os tipos de solos são altamente vulneráveis à erosão, ocorrendo um processo dinâmico entre deposição de sedimentos oriundos das demais áreas e a erosão destes sedimentos, findando no assoreamento dos canais fluviais. Por fim, a classe medianamente baixa de densidade de drenagem representa a área de menor vulnerabilidade à erosão.

TABELA 1: Síntese das características de cada classe de densidade de drenagem.

Alta	Localizada nos solos LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, com declividade maior que 50% e inserida nos relevos de Topo Convexo de Dissecação Média e Muito Alta da Formação Pirambóia, com uma cobertura vegetal incipiente de capoeira, com predominância de pastagem, cana-de-açúcar e porções de solos expostos (preparados para o cultivo).
Medianamente Alta	Concentra-se nas formações Pirambóia e Corumbataí, nos relevos de Topos Convexos de Dissecação Média e Muita Alta, em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, com declividade entre 30% e 50%, nas áreas de pastagens, cana-de-açúcar e secundariamente em solos expostos e com vegetação natural de cerrado.
Medianamente Baixa	Encontra-se nas formações areníticas Pirambóia, Botucatu, e Itaqueri e no basalto da Serra Geral, em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, nos relevos de Topos Tabulares deDissecação Muito baixa e Baixa e Convexos de Dissecação Baixa e Média, em classes de declividades entre 5% a 20%, a cana-de-açúcar é a principal classe de uso da terra e a vegetação natural são as de várzea e mata.
Baixa	Inserida nos relevos de Planície fluvial, Topos Tabulares de Dissecação Muito Baixa e Baixa e Convexos de Dissecação Muito Baixa, das formações Aluvionar e Pirambóia, em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO e GLEISSOLO TIOMÓRFICO, com classe de declividade menor que 5%, e cobertura vegetal de vegetação de várzea e mata com áreas de cana-de-açúcar e pastagem.

CONCLUSÕES

Conclui-se que os procedimentos de geotecnologias adotados (técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística) mostraram-se eficientes na confecção do mapa de densidade de drenagem, evidenciando áreas distintas quanto à vulnerabilidade à erosão. As classes de alta, medianamente alta e baixa densidade de drenagem perfazem juntas 72% da área de estudo e apresentam maior vulnerabilidade à erosão, destacando que na classe de baixa densidade de drenagem, o ambiente possibilita além da erosão, um grande aporte de sedimentos para a represa de Barra Bonita e para o rio Piracicaba. A classe de menor vulnerabilidade à erosão é a de densidade medianamente baixa. É importante ressaltar que esta análise foi possível pelas informações contidas nos mapas de geologia, geomorfologia, pedologia, declividade e vegetação e uso da terra da Sub-bacia do Baixo Piracicaba. Os resultados deste trabalho representam produtos que auxiliam no estabelecimento de diretrizes e prioridades de recuperação de áreas degradadas, como também, propor um nível de segurança adequado aos empreendimentos da agroindústria já estabelecidos na região e aos que venham a ser implementados, minimizando os processos erosivos e de assoreamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. *Bol. Inst. Geogr. Geol*, São Paulo, n.41, p.169-263, 1964.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W. L.; DANTAS, A. S. L.; CARNEIRO, C. D. R.; MELO, M. S.; BISTRICHI, C. A. *Mapa geológico do Estado de São Paulo: escala 1:500.000*. São Paulo: IPT, 1981. 124p. (Monografia 6).

ALVES, M. I. F. *Introdução à análise exploratória de dados*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1987. 40p.

CAMARGO, E; DRUCK, S. CÂMARA, G. *Análise de superfície geoestatística superficial*. Disponível em: <<http://www.inpe.br/livros.htm>>. Acesso em: em 6 ago. 2005.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. *Geografia*. v.36. n.8. p.23-42. 1979.

CHRISTOFOLETTI, A. Variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. *Notícia Geomorfológica*. v.21 n.42. p.3-22. 1981.

COLLARES, E. G. *Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari –SP*. 2000. 194f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

COSTA NETO, P. L. *Estatística*. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 364p.

LAMPARARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V. BORGHI, E. *Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações*. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118p.

LANDIM, P. M. B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253p.

LANDIM, P. M. B. Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada. In: *Textos didáticos: geomática*. 2000. Disponível em: <<http://ms.rc.unesp/igce/aplicada>> Acesso em: 1 jun de 2008.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. *TERRAE DIDÁTICA*. v.2, n.1, P.19-33 2006.

LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C. Introdução ao GSLIB. In: *Textos didáticos: geomática*. 2000. Disponível em <<http://ms.rc.unesp/igce/aplicada>> Acesso em: 1 jun de 2008.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. Krigagem ordinária para situações com tendências regionalizadas. In: *Textos didáticos: geomática*. 2002. Disponível em <<http://ms.rc.unesp/igce/aplicada>> Acesso em: 1 jun de 2008.

NASCIMENTO, P. S. R; *Subsídio à gestão ambiental hidroviária: o Empreendimento Hídrico Santa Maria da Serra*. 2004. 170f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

NASCIMENTO, P. S. R.; GARCIA, G. J. Atualização do mapa de vegetação natural e do uso da terra na Sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP) com auxílio de imagens

TM/Landsat-5. *Estudos Geográficos*, Rio Claro, v.2, n.2. p.31-45, 2004a. Disponível em: <<http://cecemca.rc.unesp.br/ojs/index.php/estgeo/article/view/251/207>> Acesso em: 21 ago. de 2008.

NASCIMENTO, P. S. R.; GARCIA, G. J. Mapa generalizado semi-automático de declividade realizado pelo Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas (SPRING). *Geoambiente On-line*. Jataí. n.2. 2004b. Disponível em: (<http://www.jatai.ufg.br/geo/geoambiente.htm>). Acesso em: 21 ago. 2008.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N., ROSSI, M.; CALDERADO FILHO, B. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo*: Escala 1:500.000. Campinas:IA, 1999. 63p.

ORTIZ, J. L. *Geoestatística*. Disponível em: <<http://gpsglobal.com.br/Artigos/Geoestat.html>> Acesso em: 29 mai. 2004.

PIEIDADE, G. C. R.; GARCIA, G. J. Características de padrões de drenagem de áreas com entalhes erosivos no município de Botucatu – SP. *Notícia Geomorfológica*, Campinas, v.21., n.42., p.75-90, 1981.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*: escala 1:500.000. São Paulo: USP;IPT;FAPESP, 1997. 64p.

SILVA, A. B. *Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos*. Campinas: Unicamp, 1999. 236p

SOARES, P.C., FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, Campinas 16 (32). p.71-104, 1976.

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

Recebido em março 2007

Aprovado em agosto de 2008