

**MAPA GENERALIZADO SEMI-AUTOMÁTICO DE DECLIVIDADE
REALIZADO PELO SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS
GEORREFERENCIADAS (SPRING)**

Paulo Sérgio de Rezende Nascimento - Doutorando em Geociências – UNESP/IGCE

Rua 7A, 1518 Apto 34 Bloco 02, Vila Nova Rio Claro (SP) - psrn@rc.unesp.br

Gilberto José Garcia - Prof. Dr. Voluntário da UNESP/CEAPLA

Av. 24A, 1515, Bela Vista, Rio Claro (SP), 13.506-900 - gilberto@rc.unesp.br

Resumo: Os métodos computacionais tradicionais (SIG's) geradores de mapas de classes de declividade não consideravam a influência dos vales fluviais e os topos de interflúvios na caracterização das zonas de declividade. Assim, o presente trabalho mostra o potencial do programa computacional Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas na confecção do mapa de classes de declividade, que utiliza a rede de drenagem e os pontos cotados como parâmetros para aumentar a precisão do produto final, além das isoípsas, comumente utilizadas. É importante ressaltar, ainda, o problema do aparecimento de pequenos polígonos no mapa temático, mas pode ser resolvido parcialmente por filtragens e em seguida por edição manual vetorial ou matricial. Este último processo de generalização é a etapa mais demorada, mas ainda assim, é mais rápida do que realizar todo o procedimento manual por ábaco. Para verificar se o produto final semi-automático é representativo, ou seja, se aproxima da realidade do terreno, utilizou-se da Tabulação Cruzada e da Estatística Kappa. Estas técnicas verificaram a semelhança entre o produto gerado pelo processo automático e aquele realizado pela edição manual. Assim, a Tabulação Cruzada apresentou 86% de concordância total entre as classes de declividade entre os dois produtos e o índice Kappa indicou uma boa similaridade entre eles. Este resultado mostra que o processo de generalização automática do mapa de classes de declividade apresenta uma forma menos nebulosa de visualização e principalmente, de manipulação dos dados.

Palavras chave: declividade, rede de drenagem.

Abstract: Slope maps derivated from the traditional GIS techniques did not consider the influence of the fluvial valleys and the top of the hills to build a triangulated irregular network (TIN). This papers shows the tools of the SPRING software, a brazilian GIS from INPE (Brazilian Spatial Research Institute) to produce slope data with the support of the drainage network. The slope data were derivadet from topographic charts (1:50.000 scale) by SPRING manipulations. The very small slope classes polygons that appear in the slope map were eliminated by filtering approach using selected threshold obtained by differents values tests. The GIS final slope map were compared with the eslop map obtained from manual approach

using cross-table and Kappa statistic techniques. The results indicated the good GIS slope map perform in terms of consideration elevation data in the valleys and top of the hills areas.

Key-words: slope, drainage network.

Introdução

Em muitos casos, é a geometria do relevo, especialmente a declividade, o principal condicionador da sua capacidade de uso/ocupação e de sustentação de empreendimentos humanos na superfície terrestre, tanto em áreas urbanas como rurais. Assim, a declividade é um atributo do relevo de grande relevância, particularmente nos trabalhos que tenham por objetivo a avaliação do uso antrópico de um determinado espaço geográfico por representar espacialmente as variações de limitações àquela ocupação face à conservação de recursos naturais presentes e mesmo frente à potencialidade a riscos de desastres. Este Documento cartográfico é imprescindível quando se pretende analisar processos que envolvam mecanização agrícola, manejo de solo, construção de barragens e hidrovias, disposição de resíduos, traçados de estradas rodo-ferroviárias, dentre tantas outras atividades humanas. Evidentemente que áreas com declividades impróprias poderão ser ocupadas, entretanto, torna-se imprescindível, a realização de estudos específicos e a construção de obras de engenharia que visem amenizar os problemas decorrentes desta medida inadequada (GUERRA, 1998).

Todo estudo que tenha por objetivo avaliar a potencialidade dos recursos naturais de uma área e a sua capacidade de sustentação quando submetida a um empreendimento, deverá incluir como uma de suas variáveis as classes de declividade (também denominada gradiente de encosta ou inclinação de vertente) existentes. A declividade é expressa geralmente em porcentagem ou pelo valor da tangente do ângulo de inclinação (DE BIASI, 1970). A declividade é uma variável não somente participante de modelos analíticos, mas também das técnicas de segmentação de áreas em praticamente todos os procedimentos de planejamento territorial (CAVALLI; VALERIANO, 2000).

A Lei de Uso do Solo, em alguns Estados, tem como um dos vetores principais o grau de inclinação das encostas para a definição do tipo de uso do solo permitido, seja para atividades urbanas ou industriais. De maneira geral os segmentos do relevo com inclinações superiores a 45% têm seu uso restritivo, sendo indicado como áreas de proteção. Não é por acaso que as expansões urbanas baseadas no processo de invasão ocorrem aí. Também, as próprias leis orgânicas estaduais/municipais consideram o ordenamento territorial como sinônimo de Uso do Solo Urbano. Deste modo, a falta de uma visão integrada sobre zoneamento torna a variável declividade como determinante do zoneamento, em um sentido

apenas de tamanho de propriedade. Assim, nas áreas com pequenas inclinações, o tamanho das parcelas é maior, enquanto que em encostas mais inclinadas, o parcelamento é menor. Como consequência, a ocupação destas áreas se torna inadequada devido à própria inclinação já representar potencialmente situação de instabilidade ou risco, independente do tamanho da propriedade.

Nas áreas rurais, os estudos sobre aptidão de uso da terra executados pelos órgãos responsáveis pelas diretrizes agrícolas (EMBRAPA e EMATER), as classes de declividade são consideradas principalmente como determinante na utilização de implementos agrícolas (mecanização) e de práticas de conservação do solo e água. No entanto, a maior parte dos municípios não apresenta leis que regulem o uso rural segundo esses e ou qualquer outro critério.

Pode-se afirmar, então, que a maioria das abordagens metodológicas que envolvem a avaliação do risco de erosão do solo, assoreamento de corpos d'água e escorregamento de encostas, baseados em práticas de conservação do solo, utilizam a declividade como uma variável que apresenta peso significativo.

Para a elaboração de uma carta de classes de declividade, diversas técnicas estão disponíveis, destacando-se aquelas proposta por WENTWORTH (1930) e por DE BIASI (1970), as quais são realizadas manualmente com auxílio de ábacos. Atualmente, com a disponibilização de sistemas *softwares*, como por exemplo os SIG's, a obtenção destas cartas pode ser feita em auxílio de computadores.

A técnica proposta por WENTWORTH (1930) consiste na divisão da área trabalhada por uma quadrícula regular, onde cada célula recebe uma determinada declividade média em função do número de curvas de nível que interceptam uma de suas diagonais. A determinação do tamanho da malha a ser utilizada consiste em uma decisão de suma importância, pois quanto maior for a célula, mais rápido se elabora a carta e maior será a sua generalização. Por outro lado, se a célula for muito pequena, será necessário um tempo maior na sua elaboração e o resultado será uma carta de difícil leitura, devido a presença de pequenas áreas mapeadas.

DE BIASI (1970) utiliza uma técnica que se baseia na aplicação de um ábaco, que possui intervalos de classes pré-estabelecidos que, ao ser deslocado entre duas curvas de nível, indica áreas homogêneas de igual declividade. Como o autor não especificou a declividade nos vales fluviais e nos topos de elevações circundados por uma mesma curva de nível, SANCHES (1993) propôs a utilização de um ábaco complementar com objetivo de preencher esta lacuna. Esta técnica, apesar de ser extremamente trabalhosa, é a única que propicia um tratamento específico para os valores dos vales fluviais e dos topos de elevações.

Na elaboração das cartas de declividade por métodos computacionais tradicionais, a área trabalhada é considerada como uma matriz bidirecional. A determinação da declividade de cada célula (pixel) é função da distribuição das curvas de nível previamente digitalizadas. Os processos automáticos apresentam como grande vantagem, a sua extrema rapidez, entretanto, como as células são geralmente muito pequenas, os produtos decorrentes desta técnica não são de fácil leitura, visto que são gerados polígonos extremamente pequenos. Contudo, esta técnica também não considerava a influência dos vales fluviais na caracterização das zonas de isodeclividade e nem a existência dos topos elevados (GUERRA, 1998).

Sistemas *softwares* mais recentes com rotinas mais completas, utilizam a rede de drenagem como linhas de quebra e dos pontos cotados como indicadores essenciais do relevo, além das usuais isoípsas (curvas de nível), o que gera cartas de declividade com maior confiabilidade, em oposição das supracitadas por GUERRA (1998). É importante ressaltar que os métodos de interpolação sobre estes dados originais acarretam importantes modificações nos resultados, como uma maior ou menor suavização das superfícies, o que influencia nas feições lineares de relevo e drenagem, conforme o objetivo desejado.

A medição manual da declividade sobre mapas com curvas de níveis é um trabalho cansativo e sujeito a erros, porém a disponibilidade de programas que fazem o cálculo automaticamente e o desconhecimento do seu desempenho ainda não permitem que sejam obtidas cartas de declividade plenamente confiáveis (VALERIANO, 2003). Entretanto, o volume de dados solicitados e as complicações advindas de simplificações da resolução geométrica (CAVALLI; VALERIANO, 2000) reforçam a necessidade de se desenvolver procedimentos adequados durante a aplicação das técnicas digitais disponíveis (VALERIANO, 1999).

Posto isto, o presente trabalho visa mostrar o potencial dos aplicativos envolvidos em um SIG na elaboração de carta de declividade generalizada semi-automatizada e de fácil obtenção. Para tal, utilizou-se o sistema computacional SPRING (Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas), que além das curvas de nível, considera a rede de drenagem e os pontos cotados, avaliando a influência dos vales dos rios e dos topos topográficos, respectivamente, na definição das isodeclividades.

O processamento automático é feito por máscaras móveis, explorando-se a função de derivação na vizinhança de cada célula para toda a área de interesse, desde da geração das grades triangular e regular até a eliminação de pixels isolados no interior das classes de declividade formadas por um conjunto maior e significativo de pixels. Este procedimento, ainda assim, produz um mapa de declividade de difícil leitura e manipulação, então,

posteriormente é realizada uma generalização manual. Esta generalização é feita manualmente pela opção de edição vetorial, visando inserir pequenos polígonos nos polígonos maiores, o que complementa o resultado da máscara anteriormente utilizada. O resultado é um produto mais compreensível, mas há de se ter o cuidado para não torná-lo irreal.

Neste contexto, o trabalho pretende indicar também que o mapa semi-automático gerado constitui uma representação adequada da realidade do terreno.

Conceitos de Modelagem da Declividade no SPRING

Este item descreve as bases conceituais disponíveis no SPRING para a confecção da carta de declividade, ajustado do item “Menu Ajuda” do Tutorial do Usuário e que se faz necessário para o entendimento dos procedimentos adotados neste trabalho. Antes, porém, foi previamente definido o ambiente de dados no SPRING e maiores detalhes sobre a arquitetura dos modelos destes dados podem ser vistos em NASCIMENTO; GARCIA (2003).

Um Banco de Dados no SPRING define um ambiente para armazenar dados geográficos, sem estar vinculado a uma área específica. Um Projeto dentro de um Banco de Dados permite especificar o espaço geográfico da área de trabalho, é onde estão inseridos os diversos dados desta área. As Categorias permitem organizar estes dados em tipos diferentes, como cadastral, temático, numérico, rede e imagem. Um Plano de Informação (PI) armazena os dados para visualização e manipulação e deve pertencer a uma única categoria do banco, mas podem existir vários PI's de uma mesma categoria em um banco. Neste trabalho há três tipos de dados: o temático, o qual possui regiões geográficas definidas por um ou mais polígonos, o modelo numérico do terreno (MNT), que representa uma grandeza que varia no espaço e por fim o dado imagem, que é a variação do nível de cinza (NC) entre 0 e 255, do preto ao branco, respectivamente.

A declividade é calculada a partir de derivadas parciais de primeira e segunda ordem obtidas de uma grade (retangular ou triangular) resultante de valores de altitude da superfície. As grades retangulares são geralmente utilizadas em aplicações qualitativas, ou seja, para visualização da superfície. Enquanto o modelo de grade irregular é utilizado quando se requer maior precisão na análise quantitativa dos dados.

A grade regular pode ser gerada a partir de pontos cotados, curvas de nível, grade regular ou irregular. Para a geração de grade retangular a partir de um TIN (“*Triangular Irregular Network*”), procedimento adotado neste trabalho, encontram-se disponíveis os interpoladores linear, Quíntico sem linhas de quebra e Quíntico com linhas de quebra, este último foi o interpolador utilizado. A conversão da grade triangular para a grade retangular é necessária quando se deseja maior precisão.

O interpolador quártico com linhas de quebra utiliza um polinômio do quinto grau e gera uma superfície mais suave quando comparada com outra grade gerada pelo interpolador linear e difere do quártico sem linhas de quebra no que se refere às linhas de quebra, pois o algoritmo reconhece a linha de quebra e a superfície ao longo dela não será suavizada. Assim, este interpolador é recomendado para situações onde as linhas de quebra são editadas para salientar feições lineares de relevo e drenagem e ao mesmo tempo deseja-se uma superfície suave.

As linhas de quebra definem descontinuidades na superfície para os dois diferentes lados da linha, como linhas de vale ou crista. Um rio, por exemplo, pode ser editado como uma linha de quebra em que ao longo de suas margens há uma descontinuidade de relevo, sem nenhum valor de cota a ela associada nas cartas topográficas.

Na modelagem da superfície por meio de grade irregular ou triangular, permite que as informações morfológicas importantes, como as descontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas e assim, preserva as feições geomorfológicas da superfície. Esta grade tem a vantagem de não precisar de qualquer tipo de interpolação sobre os dados de entrada. A desvantagem é que os procedimentos para obtenção de dados derivados de grades triangulares tendem a ser mais complexos e conseqüentemente mais demorados que os da grade retangular.

O espaçamento ideal entre pontos de uma mesma isolinha deve ser a distância média entre a isolinha e as isolinhas vizinhas. Este espaçamento ideal permite gerar triângulos mais equiláteros, que permitem modelar o terreno de maneira mais eficiente. Os pontos em excesso, ao longo de uma linha, são eliminados utilizando um procedimento de simplificação, baseado no algoritmo de Douglas-Peucker. O procedimento de Douglas-Peucker elimina pontos, considerando a distância de cada ponto a uma reta que une o primeiro e o último ponto da linha. Se todos os pontos estão a uma distância menor que uma dada tolerância, a linha será representada apenas pelos primeiro e último ponto. Se algum ponto está a uma distância maior, o ponto mais distante da reta é considerado o último e o algoritmo reinicia calculando as distâncias. Procedimento especial é tomado quando a linha representa uma ilha, isto é, quando o primeiro ponto é igual ao último. Neste caso, o penúltimo ponto é utilizado.

O valor de 0.4 mm de tolerância para eliminação de pontos foi utilizado em testes que mostraram que este valor permite gerar grades triangulares bem comportadas (procura-se triângulos o mais equiláteros possível). A distância máxima entre pontos da isolinha é definida a partir da tolerância do algoritmo de Douglas-Peucker e testes indicaram que o valor dado

por 20 vezes à tolerância pode ser utilizado. Estes valores são apresentados como *default*, na janela de geração da grade triangular.

Cada amostra é inserida por um processo que consta da definição de qual triângulo o contém, da modificação deste triângulo e de seus vizinhos, teste do critério de Delaunay e da modificação dos novos triângulos e seus vizinhos, caso seja necessário para atender a restrição imposta pelo critério de Delaunay. A triangulação de Delaunay é a mais equilateral possível e baseada no fato de uma superfície triangular ser dependente dos pontos mais próximos, ou seja, uma triangulação na qual as distâncias entre os pontos amostrados são os menores possíveis. Uma vez inseridas todas as amostras, uma triangulação está disponível. No entanto, esta triangulação pode não ter todos os triângulos respeitando o critério de Delaunay. Para garantir que a triangulação seja Delaunay, todos os triângulos são testados em relação a seus vizinhos, na mesma seqüência em que foram criados.

Abordagem metodológica

Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as Folhas Topográficas do IBGE, na escala 1:50.000, como segue: Dois Córregos (SF-22-Z-B-III-3-1974); Brotas (SF-22-Z-B-III-4-1974); Itirapina (SF-23-M-I-3-1969); Piracicaba (SF-23-Y-A-IV-4-1974); Capivari (SF-23-Y-A-IV-4-1970); Laras (SF-23-Z-M-III-3-1970); São Pedro (SF-23-Y-M-III-2-1970); Barra Bonita (SF-23-Z-M-III-4-1974) e Santa Maria da Serra (SF-22-Z-B-VI-3-1970). Utilizou-se o *software* SPRING (Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas), disponível gratuitamente no *site* do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). As imagens orbitais usadas são as do sensor/satélite TM/Landsat-5, referentes à órbita e ponto 220/73, passagem de 21 de abril de 2002, obtidas no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

A área de estudo é a Sub-bacia Hidrográfica do Baixo Piracicaba, localizada no setor central do território paulista, sendo delimitada aproximadamente pelos paralelos 22°15' a 22°45' de latitude Sul e pelos meridianos 47°45' a 48°30' de longitude Oeste (Figura 1).



Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

Geologicamente, situa-se na parte Nordeste da Bacia do Paraná, no estado de São Paulo, apresentando predominantemente exposições de rochas dos grupos Passa Dois (Formação Corumbataí), São Bento (formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) e Coberturas Cenozóicas (Formação Itaqueri e Aluviões) (ALMEIDA et al., 1981). Nestas seqüências sedimentares e ígneas fanerozóicas desenvolveram as províncias geomorfológicas denominadas de Depressão Periférica e Cuestas Basálticas, as quais estão compartimentadas, na área em foco, em Depressão Médio-Tietê e Planalto Residual de São Carlos (PONÇANO et al., 1981). O regime pluviométrico é tropical típico, com um período chuvoso, de outubro a abril, e um período de estiagem, de maio a setembro, com índices de precipitação pluviométrica entre 1.100 e 1.800 mm e temperaturas médias de 18 a 22°C (SETZER, 1966). Os principais solos desenvolvidos nestas condições clima-morfo-geológicas são os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS, LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS, NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS e GLEISSOLOS TIOMÓRFICOS, que foram mapeados por OLIVEIRA et al. (1999) e reclassificados de acordo com EMBRAPA (1999). As principais tipologias de uso e ocupação de solo são as cana-de-açúcar e pastagem e a cobertura vegetal natural é constituída por vegetação de várzea, mata, cerrado e capoeira (COMITÊ..., 2000).

Metodologia

O primeiro procedimento foi definir o modelo físico no ambiente SPRING para operacionalização neste sistema de dados geo-relacional, significando definir um Banco de Dados (BD), um Projeto, as Categorias e os Planos de Informação (PIs).

Após a concepção do Banco de Dado Geográfico (BDG) no SPRING, realizou-se a preparação dos dados para a respectiva inserção, via digitalização ou importação, destes dados no BDG concebido. Esta etapa englobou os seguintes procedimentos:

- as curvas de nível e a rede de drenagem foram importadas automaticamente, pois já estavam disponíveis em formato DXF. Porém, para aumentar as informações e conseqüentemente, a qualidade do produto final, em termos de nível de confiança, a rede de drenagem foi complementada com as imagens TM-Landsat-7, através das bandas 4 e 5 e foram necessários alguns ajustes nas altitudes destas curvas de nível, as quais apresentavam originalmente a equidistância de 20 metros;
- por fim, os pontos cotados, os quais se encontravam no formato analógico foram transformados em digital pela digitalização manual, a partir das cartas topográficas, via mesa digitalizadora.

Para evitar algum tipo de interferência ou erro de processamento, o Plano de Informação curvas de nível/pontos cotados foi subdividido em dois: um para as isoípsas com cotas entre 460 e 580 metros pertencentes à Depressão Periférica e outro para as isoípsas com cotas entre 600 e 1060 metros.

Para cada PI isoladamente foi ativado para a geração da grade triangular (TIN) no Menu MNT, opção Geração de Grade Triangular, definiu-se o PI de saída e selecionou-se a triangulação de Delaunay, informou que o interpolador usará linhas de quebra pela indicação do PI rede de drenagem, o qual também foi separado em dois PIs de acordo com as altitudes das curvas de nível. O passo seguinte foi o de simplificação de linhas. Esta é a fase do pré-processamento dos dados pelos parâmetros de Tolerância de Isolinhas, Distância de Isolinhas e Tolerância de Linhas de Quebra, os quais foram usados os valores 10, 200 e 10 metros, respectivamente para o PI com isoípsas de 460 a 580 e 5, 100, e 5 para o outro PI. Por fim, definiu-se a triangulação pela Menor Aresta com o valor 2m, que é o valor *default* do SPRING para os dois PIs. É importante ressaltar, que antes de optar por estes valores, vários testes foram realizados em pequenas e significativas regiões da área de estudo. Foram estes testes também que possibilitaram entender que separando as curvas de nível em dois PIs conforme as suas altitudes, mais fácil seria definir os valores ótimos acima descritos.

Após ter gerado o TIN, este serviu de dado de entrada para a determinar a Grade Retangular pelo interpolador Quíntico com Linhas de Quebra e então os dois PIs que estavam

separados foram unidos. De posse da Grade Retangular, agora contendo as informações sobre toda a área de estudo, foi gerada a Grade de Declividade em porcentagem, onde os valores das classes de declividade foram previamente definidos. Então, realizou-se o Fatiamento, que consiste em gerar uma imagem temática a partir de uma grade de declividade, com as seguintes classes de declividades: < 2%, 2 a 5%, 5 a 10%, 10 a 20%, 20 a 30%, 30 a 50% e > 50%. É importante ressaltar que a definição dos valores das declividades foram as mesmas definidas pelos pesquisadores do INPE, tais como CREPANI et al. (1996), SOUZA (1998) e MEDEIROS (1999) para definir o zoneamento ecológico e a vulnerabilidade a processos erosivos e de assoreamento, assim como propor restrições ao uso da terra.

Desta forma, um Plano de Informação da categoria numérica originará um Plano de Informação de categoria temática representando um aspecto particular do Modelo Numérico de Terreno, conseqüentemente cada fatia deve ser associada a uma classe temática previamente definida no Esquema Conceitual do Banco de Dados. Esta associação se dá no plano gráfico do visualizador, onde cada valor das fatias recebe uma cor que o represente no espaço geográfico.

O PI classes de declividade resultante apresentou polígonos pequenas dimensões correspondentes a frações do terreno com o mesmo valor de declividade. Por esta razão, este produto foi submetido a um processo filtragem por vizinhança, ou seja, os pequenos polígonos trocariam de classes influenciados por outros maiores que lhes fossem vizinhos. Este procedimento melhora visualmente o resultado retirando-se pontos isolados, isto é, pontos espúrios, diferentes de seus vizinhos. Assim, pelo LEGAL (Linguagem Especial para Geoprocessamento Algébrico) foi criado um filtro, baseado no filtro de Pós-Classificação usado para imagens classificadas automaticamente, com o objetivo de eliminar pontos isolados, diferentes de sua vizinhança e gerar um produto com uma melhor aparência.

Este filtro apresentou uma janela 3 x 3 pixel, onde o ponto central é avaliado quanto à frequência das classes em sua vizinhança de acordo com os valores de Peso e Limiar. O peso define o número de vezes que será considerada a frequência do ponto central e o limiar é o valor de frequência acima do qual o ponto é modificado. Então, definiu-se o valor 1 tanto para o peso quanto para o limiar, pois quanto menores estes valores, maiores o número de substituição que são considerados. Assim, cada ponto do mapa, o programa analisa sua vizinhança 3 x 3 e decide se o ponto permanece ou é substituído pela classe mais freqüente na vizinhança. O produto apresentou-se com uma aparência mais fácil de visualizar e analisar, porém, ainda, ocorriam vários pequenos agrupamentos de pixels dentro e nas bordas de classes maiores. Dessa forma, então, foi realizada manualmente a substituição desses pixels pela

Opção Classificação de Pixel no Menu Edição Matricial, o que definiu melhor os limites das classes.

Após este procedimento, foi digitalizado o Mapa de Declividade, que estava no formato matricial ou *raster*, tornando-o vetor, que exige menos espaço de armazenamento. Este procedimento foi feito de forma manual, porque a automática, apesar de mais rápida, não diminui o tamanho do arquivo. E como há limites de tamanho impostos pela própria configuração dos sistemas operacionais (CAVALLI; VALERIANO, 2000), ou mesmo da capacidade do microcomputador utilizado, o processamento de arquivos muito grandes fica prejudicado.

Com a finalidade de constatar se a diferença entre os dois produtos era significativa, foram realizados dois procedimentos: a Tabulação Cruzada e Estatística Kappa. Ambos significam o confronto entre o Mapa de Declividade Automático, gerado após a aplicação do filtro, aqui também chamado de produto automático, e o Mapa de Declividade Generalizado após a edição manual, também chamado de produto final semi-automático. Este confronto visa obter o grau de semelhança entre ambos.

A Tabulação Cruzada permitiu o cálculo do número de pixels entre as classes de declividade dos mapas citados e gerou uma matriz de erro. A diagonal principal indica a porcentagem de pixels concordantes entre os mapas, o que fornece o desempenho global e de cada classe (ROSENFELD; FITZPATRICK-LINS, 1986; STORY; CONGALTON, 1986). O desempenho global é calculado pela porcentagem do somatório da diagonal principal pelo número total de pixels. E o desempenho por classe é a porcentagem entre o número de pixels da diagonal principal referente a uma determinada classe e o número total desta classe. Posteriormente, esta matriz foi utilizada para a aplicação da estatística Kappa.

O algoritmo utilizado para a estatística Kappa foi desenvolvido por MEDEIROS (1987) e implementado por PONZONI; ALMEIDA (1983), e indica a similaridade existente entre os dois mapas de declividade pelo teste de independência, com nível de confiança de 95%, onde a primeira hipótese é $K = 0$, o que significa que não há concordância e a segunda hipótese é $K > 0$, que indica concordância. Foi adotado o nível de significância igual a 0,05, e o valor de Z para o correspondente índice Kappa maior que 1,64, de forma a rejeitar a primeira hipótese. Estas técnicas estatísticas fornecem a exatidão ou acurácia do resultado, que expressam a probabilidade de acerto, e não a precisão, que está relacionada com a medição aplicada à obtenção do dado.

Resultado

O Banco de Dados criado possui Gerenciador ACESS e o Projeto está na projeção UTM/Córrego Alegre, cujo retângulo envolvente da área de estudo possui as coordenadas plano-retangulares: $X_{min} = 155.141$, $Y_{min} = 7.467.641$, $X_{max} = 224.267$ e $Y_{max} = 7.518.319$. Então foram criadas duas categorias MNT e duas Temáticas na escala 1:50.000 e com resolução de 10 por 10 metros. A primeira categoria MNT foi a Altimetria e com o Plano de Informação (PI) Dado Altimétrico, o qual contém as curvas de nível, os pontos cotados, o TIN (*Triangular Irregular Network*), a grade regular e a sua imagem em nível de cinza. Desta forma, em uma mesma categoria, tem-se um único PI contendo as opções Amostra (distribuição espacial das curvas de nível e dos pontos cotados); Texto (distribuição dos valores das curvas de nível e dos pontos cotados); TIN, Grade Regular e Imagem. A segunda categoria MNT é a Grade e com o PI Dados da Grade de Declividade, que além dos dados numéricos da declividade, contém também a sua imagem em NC. Uma categoria Temática foi a Drenagem, com o PI Rede de Drenagem e a última foi Fatiamento com as classes de declividade e o PI Mapa de Declividade.

O resultado dos TIN apresentou triângulos se não totalmente equiláteros, foram bastante próximos, consequência direta da separação em dois compartimentos a partir das curvas de nível muito próximas originárias de um relevo escarpado das Cuestas Basálticas e as mais afastadas dos relevos dissecados da Depressão Periférica e pela inserção de pontos cotados de modo a representar melhor o relevo da área. Estes procedimentos possibilitaram um melhor resultado devido à flexibilidade de definir parâmetros de distâncias e tolerâncias de isolinhas e de linhas de quebra distintos para cada compartimento e entre curvas de nível muito afastadas ou fechadas. Como consequência, as grades regular geradas representaram com maior fidelidade a superfície terrestre da sub-bacia. Estas duas grades foram unidas em um mesmo PI (operação Mosaico), que contém os dados numéricos da grade retangular e a sua distribuição na forma de Imagem em NC.

O Mapa de Classes de Declividade (FIGURA 02) gerado pela operação de fatiamento é uma carta temática em representação matricial, onde as sete classes de declividade aparecem distribuídas espacialmente, cada uma representada por uma cor e que pode ser visualizada no PI Mapa de Classes de Declividade no SPRING. Como já exposto na metodologia, o resultado deste procedimento apresentou muitos pixels e/ou grupos pixels, representativos das sete classes de declividade, distribuídos esparsamente em classes de declividades de representatividade espacial maior. Este fato, gerou um mapa de difícil leitura, entendimento e manipulação. Isto se agrava mais quando se necessita deste mapa para integrar com outros

mapas do meio físico, biótico e de uso do solo para gerar um mapa, por exemplo, de vulnerabilidade à erosão, ou qualquer outro produto que sirva de subsídio para análise e gerenciamento ambiental.

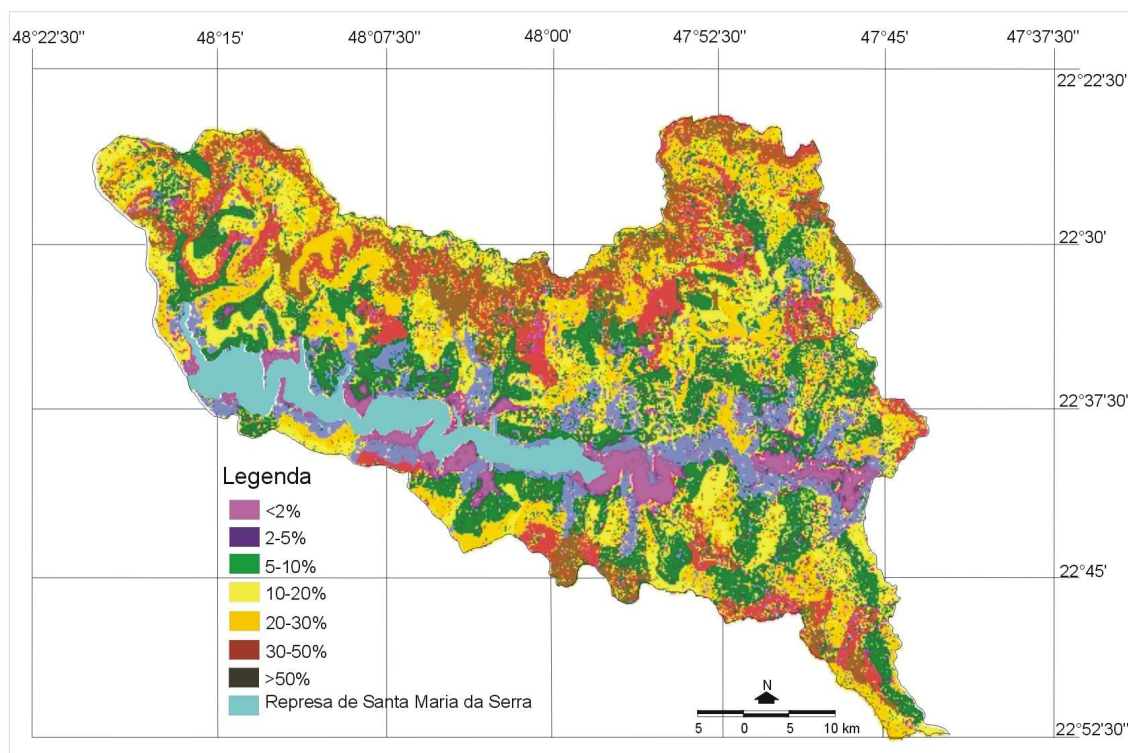


FIGURA 02 – Mapa de Classes de Declividade Automático.

Desta forma, fez-se a filtragem do mapa inicialmente obtido, resultando num segundo produto (FIGURA 03), no qual observa-se uma redução de informação. Neste caso, corre-se o risco da geração de um documento carta que não mantenha as mesmas características de distribuição espacial do originalmente obtido.

A generalização aqui adotada produziu um documento cartográfico temático de fácil leitura e de fácil digitalização. O procedimento mais demorado foi a filtragem de um grande número de polígonos extremamente pequenos. Comparando-se os dois produtos, verifica-se a permanência de similaridade entre eles. No entanto a técnica de tabulação cruzada permitiu uma comparação mais precisa. A TABELA 01 apresenta as interseções dos pixels corretos e incorretos dentro de cada classe de declividade.

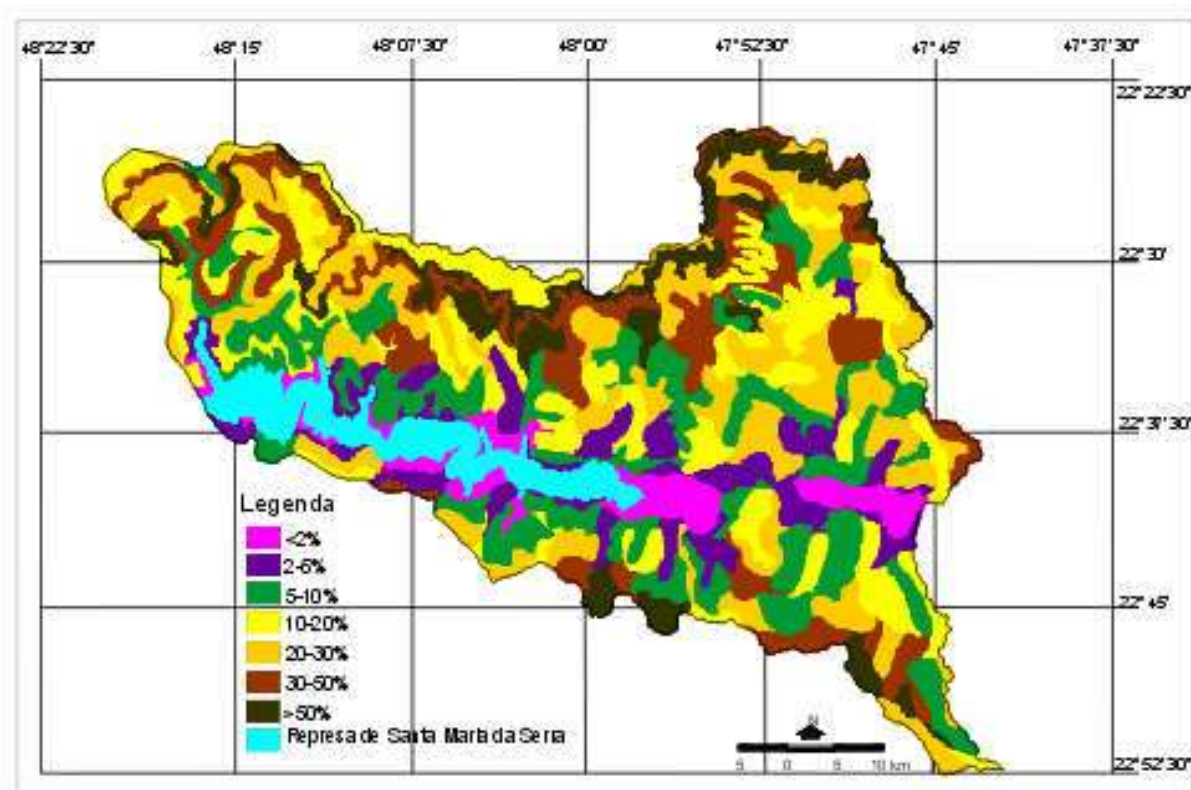


FIGURA 03 – Mapa de Classes de Declividade Generalizado com Filtragem.

TABELA 01 – INTERSEÇÕES DOS PIXELS ENTRE O MAPA DE CLASSES DE DECLIVIDADE AUTOMÁTICO E O MAPA DE CLASSES DE DECLIVIDADE GENERALIZADO (HOMOGENEIZAÇÃO TEMÁTICA) – TABULAÇÃO CRUZADA

		Declividade Generalizada							
Classes de Declividade	< 2 %	2-5 %	5-10 %	10-20 %	20-30 %	30-50 %	>50 %	Total	
	< 2 %	934.03 7	30.502	20.661	15.367	4.229	1.808	385	1.006.9 89
2-5 %	33.107	1.460.9 18	51.251	54.754	13.130	7.685	2.702	1.623.5 47	
5-10 %	88.407	90.087	2.865.1 36	107.08 9	60.561	23.701	3.048	3.238.0 29	
10-20 %	47.804	100.01 2	87.569	2.369.7 42	101.34 4	31.919	7.640	2.746.0 30	
20-30 %	20.503	80.310	155.35 4	200.32 1	2.317.0 99	54.305	26.108	2.854.0 00	
30-50 %	15.807	35.793	47.240	27.129	90.719	1.552.2 64	62.584	1.831.5 36	
>50 %	5.627	9.931	23.649	21.637	69.329	104.92 1	867.95 9	1.103.0 53	
Total	1.145.2 92	1.807.5 53	3.250.8 60	2.796.0 39	2.656.4 11	1.776.6 03	970.42 6	14.403. 184	

A classe <2% totaliza 7% no mapa de declividade automática e 8% no de declividade generalizada e a concordância entre elas é de 83%. O primeiro cálculo é a porcentagem total de pixel de cada classe com relação ao total de pixel de todas as classes, no caso acima são 1.006.989 e 1.145.292 pixels da classe <2% e 14.403.184 pixels de todas as classes; e a porcentagem de concordância entre as mesmas classes é feita entre o total de pixels concordantes das mesmas classes nos respectivos mapas, dada pela diagonal principal da matriz de erro e o total de pixel da classe, dado pelo somatório de todos os pixels desta classe no mapa de declividade automática. Assim, no exemplo anterior, estes valores são 934.037 e 1.006.989. As declividades >50% perfazem 8% e 7% da área total e são concordantes em 79%. Entre estas classes têm-se as demais: 2-5%, 5-10%, 10-20%, 20-30% e 30-50%, que representam 11% e 13%, 22% e 23%, 19% e 19%, 20% e 18% e 13% e 12%, com concordância de 90%, 88%, 86%, 81% e 85%, respectivamente entre as mesmas classes de declividades dos dois mapas. A soma dos pixels da diagonal principal da matriz de erro é de 12.367.155, este valor indica a concordância global, que é de 86%, pois é a porcentagem do total de pixels da área.

O valor 0,51 do índice Kappa indica um bom resultado, pois segundo a avaliação sugerida por LANDIS; KOCK (1997), os valores de Kappa entre 0,4 e 0,6 indicam uma boa similaridade entre os produtos comparados. Além disso, como o Kappa é maior que zero e o valor de Z é maior 1,64, entende-se que houve concordância entre a comparação dos dois produtos, com um nível de confiança de 95%.

O arranjo espacial das classes de declividade denuncia um forte controle estrutural de caráter geológico que pode ser explicado pela ocorrência de falhamentos, fraturamentos, resistência da rocha e por discontinuidades litológicas (FIGURA 04). Este controle tecto-estrutural e a dinâmica morfo-climática que desenvolveram processos circundenudacionais é que são refletidos nas províncias geomorfológicas Depressão Periférica e Cuesta Basáltica. Além disso, sobressai a atividade antrópica como fator morfogenético na evolução das formas de relevo, pela alteração da paisagem, a partir da apropriação do território, tanto para a criação e expansão de centros urbanos quanto aos empreendimentos rurais. Esses aspectos associados a uma relativa importância das classes de declividade superiores a 20% levam à hipótese da importância espacial de áreas com potencial de risco e instabilidade em relação aos processos erosivos.

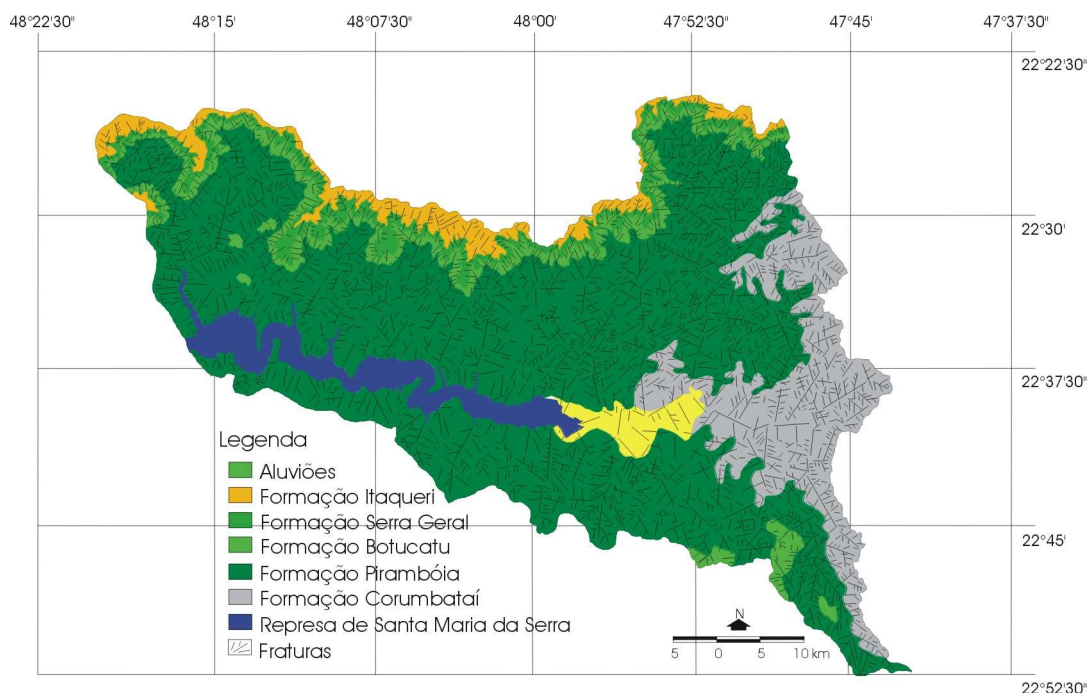


Figura 04 – Mapa geológico com enfoque nas unidades litológicas e nos feixes de fratura.

O desempenho do SPRING para tratamento dos dados mostrou-se satisfatório, o que permitiu atingir o objetivo proposto, mantendo uma boa qualidade do resultado. Além disso, o SPRING é um programa nacional e disponível no *site* do INPE e então sua utilização apresenta-se como uma alternativa viável a todos que possuem computador. É capaz de operar com toda a sua funcionalidade em ambientes que variem desde micro-computadores a estações de trabalho de alto desempenho.

Conclusões

Desta forma, é notória a importância do Mapa de Declividade para a área de estudo e como para cobrir toda a esta sub-bacia são necessárias nove cartas topográficas na escala de 1:50.000, o tempo para se confeccionar manualmente por ábaco é muito grande, o que piora se mudar desta escala regional para escala de detalhe. Assim, a automatização ou a semi-automatização no processo de confecção das cartas de declividade se fazem necessárias. Desta forma, a metodologia aplicada foi rápida e eficiente, o programa computacional utilizado, além de ser de domínio público, foi capaz de gerar um produto adequado, porém ainda com uma aparência de difícil compreensão e manipulação. No entanto, o próprio programa permite eliminar os polígonos isolados e pequenos (considerados espúrios) no interior ou na borda das classes de declividades representadas por polígonos espacialmente maiores e assim mais significativos para a escala de trabalho. Para finalizar, as técnicas de Tabulação Cruzada e Estatística Kappa foram capazes de comprovar a similaridades entre os dois produtos.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F. F. M. et al. *Mapa geológico do Estado de São Paulo: escala 1:500.000*. São Paulo: IPT, 1981. 124p. (Monografia 6).
- CAVALLI, A. C.; VALERIANO, M. M. Suavização da declividade em função da resolução da imagem em sistema de informação geográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande: DEAg/UFCG, v.4, n.2, p.295-298. 2000.
- COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. *Situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí*. [S.I.], 2000. 1CD.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V. *Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico*. São José dos Campos: INPE, 1996. 18p.
- DE BIASI, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. *Geomorfologia*. São Paulo, v.21, p.8-13. 1970.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema brasileiro de classificação do solo*. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p.
- GUERRA, S. M. S. *Cartografia geológico-geotécnica de áreas costeiras: o exemplo de Suape-PE*. 1998.187f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- LANDIS, J.; KOCK, G. G. The measurements of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v.33, n.3, p.159-174, 1977.
- MEDEIROS, J. S. *Desenvolvimento metodológico para detecção de alterações da cobertura vegetal através de dados MSS/Landsat*. 1987. 81f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- MEDEIROS, J. S. *Bancos de dados geográficos e redes neurais artificiais: tecnologias de apoio à gestão do território*. 1999. 221f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- NASCIMENTO, P. S. R.; GARCIA, G. J. Modelo lógico orientado de objetos para aplicações geográficas e modelo físico do ambiente do Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas para a gestão ambiental em hidrovia. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE TRANSPORTE HIDROVIÁRIO INTERIOR, 3., Corumbá, 2003. *Anais...* Corumbá:SOBENA. 2003. (1CD).

- OLIVEIRA, J. B. et al. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida*. Campinas:FAPESP; 1999. 63p.
- PONÇANO, W. L. et al. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT, 1981. 94p. (Monografia 5).
- PONZONI, F. J.; ALMEIDA, E. S. A estimativa do parâmetro Kappa (K) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., Salvador, 1996. *Anais...* São José dos Campos, INPE/SELPER. 1996. (1CD).
- ROSENFELD, G. H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classifications accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. New York: McGraw-Hill, v. 52, n.2, p.223-227. 1986.
- SANCHES, M. C. A propósito das cartas de declividade. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5., 1993. São Paulo. *Anais...* São Paulo:FFLCH,1993.
- SETZER, J. *Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo: comissão interestadual da Bacia Paraná-Uruguai*. São Paulo:CESP, 1966. 61p.
- SOUZA, C. J. S. *Carta de vulnerabilidade à erosão como subsídio ao zoneamento ecológico-econômico*. 1998. 171f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- STORY, M. CONGALTON, R. G. Accuracy assessment: a users perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. New York: McGraw-Hill, v. 52. n.3 p.397-399. 1986.
- VALERIANO, M. M. *Estimativa de variáveis topográficas para modelagem da perda de solos por geoprocessamento*. 1999. 172f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- VALERIANO, M. M. Mapeamento da declividade em microbacia com sistemas de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande: DEAg/UFCG, v.7, n.2, p.303-310, 2003.