

# INTEGRAÇÃO DE GEOINFORMAÇÕES: APLICAÇÃO DAS GEOTECNOLOGIAS EM HIDROGEOLOGIA

*Paulo Sérgio de Rezende Nascimento<sup>1</sup>*

**RESUMO** - Os lineamentos estruturais e a altitude do terreno comportam o sistema de drenagem na área de estudo, desse modo, o objetivo deste trabalho foi integrar o mapa de densidade de lineamento geológico com o mapa de altitude estrutural, definindo assim áreas favoráveis à recarga e descarga da Sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP). Para tal, foram utilizados os seguintes procedimentos: extração dos lineamentos pelo método fotointerpretativo de imagens de satélite, geração do mapa de densidade de lineamentos estruturais pelo método geostatístico de krigagem, modelagem numérica do terreno para gerar o mapa de altitude estrutural e integração destes mapas para produzir o mapa de favorabilidade à recarga e descarga de águas subterrâneas. De acordo com o resultado obtido, identificaram-se quatro diferentes áreas de favorabilidade à recarga e descarga.

**ABSTRACT** - The structural lineaments and the elevation of the land supporting the drainage system of the study area, this work aims to integrate the maps of the density of geological lineaments and structural. Hence, favorable areas to the recharge and discharge of the Sub-basin of the Low Piracicaba River (SP) have been defined. The present work employs the following procedures: extraction of lineaments for the visual interpretation method of satellite images; generation and integration of maps geological lineaments density for the geostatistician method of kriging and structural latitude for the digital terrain model to obtain the thematic map of recharge and discharge of water underground. Such data indicated that four different areas of favorability to the recharge and discharge.

**Palavras-chave** – Inferência espacial, hidrogeologia, lineamento geológico.

---

<sup>1</sup> Professor Visitante da Pós-Graduação em Geociências da UFAM; Av. General Rodrigo Octávio, 3.000, Bairro Coroado, 69.077-000, Manaus - AM; (92) 3305-2862; psrn.geologia@gmail.com

## 1 – INTRODUÇÃO

A análise interpretativa das imagens orbitais dos terrenos paleo-mesozoicos da Bacia Sedimentar do Paraná no Estado de São Paulo mostrou a evidência de uma enorme quantidade de feições lineares fortemente expressas na topografia, invariavelmente representadas pela morfologia dos vales e/ou serras e significativamente, de acordo com Liu (1987), relacionadas a processos endógenos e exógenos, com feições estruturais e erosivas. A Sub-bacia Hidrográfica do Baixo Piracicaba (SP), área de estudo desse trabalho, inserida nessa bacia sedimentar, pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba, a qual é, em geral, estudada juntamente com as Bacias dos Rios Capivari e Jundiaí, devido às reversões existentes no abastecimento público dos municípios de Jundiaí e Campinas. Assim, elas estão inseridas na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Piracicaba, Capivari e Jundiaí (UGRHI PCJ) e são gerenciadas pelo seu respectivo Comitê. Esta unidade hidrográfica localiza-se na região centro-sudeste do Estado de São Paulo, é o segundo pólo industrial do país e seu sistema geoeconômico é o mais dinâmico do Estado. Parte substancial dos recursos hídricos de superfície é transferida para o Sistema Cantareira que, atualmente, sofre a maior seca de sua história, desde o início dos anos de 1970.

A Sub-bacia do Baixo Piracicaba situa-se no centro-oeste paulista, delimitada pelos paralelos 22°15' a 22°45' de latitude Sul e pelos meridianos 47°45' a 48°30' de longitude Oeste. O Baixo Piracicaba inicia-se à jusante da confluência do rio Corumbataí e termina na confluência com o rio Tietê, e as principais vias de acesso são as rodovias estaduais SP-308, SP-304 e SP-191 (Figura 1). O rio Piracicaba é controlado pela direção E-W com inflexões para NW e NE e os afluentes citados estão controlados pelas direções NE e N-S (margem direita) e NW e N-S (margem esquerda).

A área de estudo 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. Esse quadro define o modelo mais apropriado para entender a dinâmica da paisagem desta sub-bacia, que é tectono-erosivo. Aliada a esta dinâmica, ressaltasse os empreendimentos rurais relacionados à agricultura e à agroindústria também responsável pela evolução da paisagem.

A estrutura produtiva da região está ligada à monocultura de cana-de-açúcar e estas unidades produtivas desenvolvem tecnologias e as agregam à produção, cuja mecanização encontra-se em processo de intensificação e otimização. Aliada à mecanização, o processo de irrigação é essencial para o processo produtivo.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é integrar os mapas de concentração de lineamentos geológicos e de altitudes estruturais, visando definir áreas propícias à exploração de águas para uso de irrigação através da delimitação de áreas favoráveis à recarga e descarga das águas subterrâneas na sub-bacia do Baixo Piracicaba, na escala de 1:50.000.

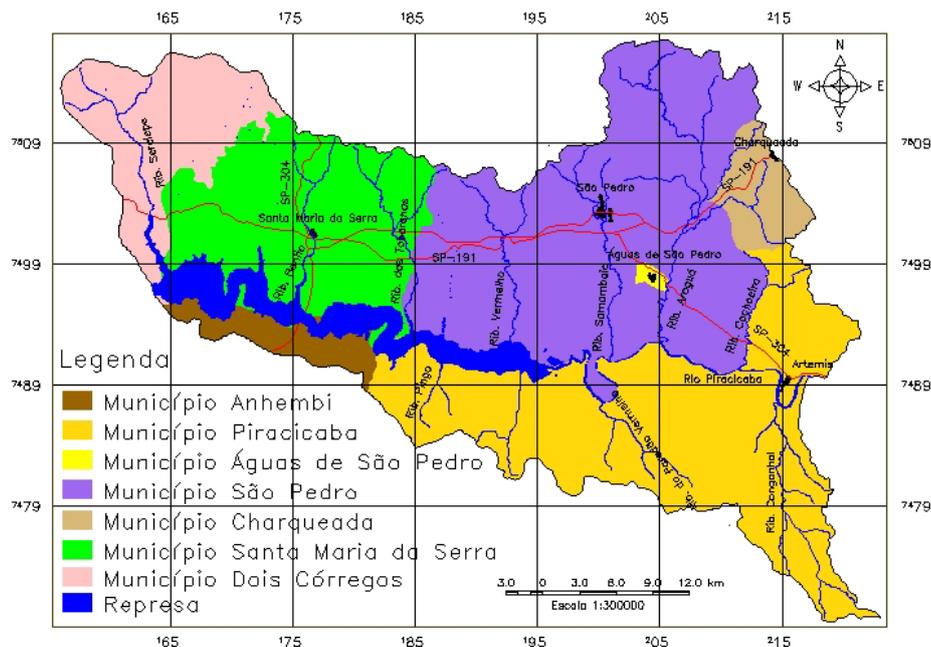


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, suas principais rodovias, seus municípios e principais afluentes do rio Piracicaba.

Existem vários métodos possíveis de se mapear as áreas favoráveis à recarga e descarga de águas subterrâneas. O método desenvolvido nesse trabalho baseia nas ferramentas de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica (SIG). Essas ferramentas permitem a confecção de mapas por interpretação de imagens, inferência espacial e integração de geoinformações, além de possibilitar o armazenamento, manipulação e visualização dos dados em um Banco de Dado Georreferenciado. É importante ressaltar que a concentração de informações digitais em uma base unificada permite a atualização constante dos dados, como por exemplo, a inserção de novos dados e/ou novas integrações, gerando outros produtos.

O procedimento realizado foi definido devido à área ser recoberta praticamente pelos arenitos da Formação Pirambóia, onde a porosidade e a permeabilidade, que são indicadores utilizados para determinar o aporte, o acúmulo e a dispersão de águas subterrâneas em terrenos sedimentares, podem ser consideradas as mesmas em toda a extensão da bacia. Além disso, o índice pluviométrico é também praticamente constante por toda a área de estudo, de acordo com Cavalli (1999). Ainda, os lineamentos geológicos definem as regiões de infiltração das águas, quanto maior a sua densidade maior a infiltração das águas e quanto menor a densidade menor será a infiltração e as baixas e altas altitudes íngremes representam as áreas mais favoráveis à descarga de águas subterrâneas e as planas, por outro lado, mais favoráveis à recarga, de acordo com Christofolletti (1996), pois para cada ambiente, os sistemas hidrográficos dependem principalmente das proporções de infiltração e escoamento da água.

## 2 - MATERIAL E MÉTODO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as imagens orbitais do sensor/satélite OLI/Landsat-8 (Figura 2), disponível gratuitamente pelo *United State Geological Survey* (USGS); e a base cartográfica é composta pelas folhas topográficas, na escala 1:50.000, como segue: Dois Córregos, Brotas, Itirapina, Piracicaba, Capivari, Laras, São Pedro, Barra Bonita e Santa Maria da Serra. Os procedimentos operacionais foram realizados no programa gratuito de geoprocessamento SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O primeiro procedimento foi a criação do Banco de Dado Georreferenciado (BDG), com projeção UTM/WGS-84 com meridiano central 45° Oeste, cujo retângulo envolvente da área de estudo possui as coordenadas plano-retangulares:  $X_{mim} = 155.141$  m,  $Y_{min} = 7.467.641$  m;  $X_{max} = 224.267$  m e  $Y_{max} = 7.518.319$  m. A escala adotada foi de 1:50.000, de acordo com a base cartográfica. A seguir foi inserida a base cartográfica diretamente para o BDG, especificamente a rede de drenagem, as isoípsas (com equidistância de 20 metros) e os pontos cotados, que se encontravam no formato digital (DXF) e realizados alguns ajustes de edição em algumas curvas de nível interrompidas e sem seus valores altimétricos. As imagens OLI-Landsat-8 foram importadas e armazenadas no SPRING e então, georreferenciadas para o sistema de coordenadas de referência definido anteriormente.

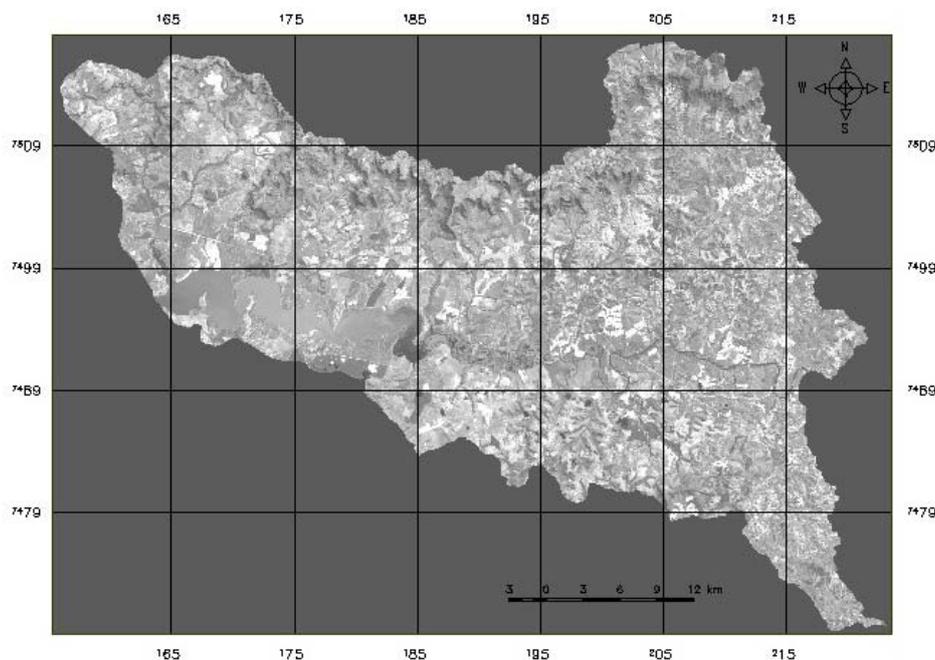


Figura 2 – Banda 8 (pancromática) sem realce do sensor/satélite OLI-Landsat-8 (Resolução espacial de 15m).

O próximo procedimento foi a extração dos lineamentos geológicos a partir do mapa de rede de drenagem e das bandas Multiespectrais 1 a 7 e 9 e Pancromática (Banda 8) das imagens OLI-

Landsat-8, de acordo com o método lógico para imagens orbitais da metodologia desenvolvida por Veneziani e Anjos (1982). Essa etapa foi feita diretamente no monitor do computador e assim as rotinas computacionais possibilitaram a realização de diversos processamentos digitais, como: restauração, realce de contraste, principais componentes, filtragem direcional, composição colorida e fusão de bandas. Esses processamentos aumentaram o brilho, o contraste, as feições lineares e a resolução geométrica das imagens, o que em muito facilitou a confecção do mapa vetorial de lineamento geológico.

Terminado esse mapa, ele foi convertido para o formato matricial, pois o SPRING leva em consideração o número de pixels de cada lineamento e não o seu comprimento vetorial. A dimensão média e distribuição dos lineamentos permitiram que a área fosse dividida em células de 4.000 x 4.000 metros, criando um mapa cadastral para o armazenamento da densidade de lineamento. Neste procedimento foram utilizados os operadores de álgebras de mapas Conte e Média Zonal, os quais contam o número de pixels em cada célula e inserem na tabela de objetos a média do número de pixels em cada célula (parâmetro Z estimado). Para criar os planos de amostragem (do modelo numérico) utilizou-se a ferramenta de geração de pontos amostrais, estando agora no formato adequado para aplicar o método de krigagem, e assim foi aplicada a krigagem ordinária, cujo interpolador, segundo Landim (2005), pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade.

O mapa de altitude estrutural foi gerado pelo Modelo Numérico do Terreno (MNT) a partir das curvas de nível e dos pontos cotados por meio de uma grade irregular triangular (TIN). Essa modelagem considera as arestas dos triângulos e permite que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales) e planares (declividade), sejam empregadas durante a geração da grade triangular, possibilitando modelar a superfície do terreno e preservar as feições geomórficas da superfície. Essa grade tem a vantagem de utilizar os próprios pontos amostrados para modelar a superfície, sem a necessidade de qualquer tipo de interpolação sobre os mesmos, porém tende a ser mais complexo e conseqüentemente mais demorados que os da grade retangular, como mostrado no trabalho de Câmara *et al.* (1996).

As imagens geradas pela krigagem e pelo MNT foram divididas em quatro classes com intervalos diferentes de acordo com a da frequência dos níveis de intensidades dos níveis de cinza, pelo fatiamento e a posterior equalização do histograma. 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-íris, o qual segue a sequência do arco-íris, como o próprio nome já indica e o número de fatias 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 frequência dos níveis de intensidade. Foi possível, assim, separar de forma objetiva quatro classes de densidade de lineamentos geológicos e quatro classes de altitudes estruturais. A definição das áreas favoráveis à recarga e descarga de água subterrânea foi realizada pelo método booleano, utilizando as classes dos mapas de densidade de lineamento geológico e altitude estrutural, expressas por classes favoráveis ou a recarga ou a descarga de água para obter o mapa temático de interesse. O método Booleano envolveu a combinação lógica de mapas binários através do operador condicional E e/ou OU, segundo uma sequência lógica. Terminado esses processos, os mapas no formato matricial (*raster*) foram vetorizados automaticamente.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 3 e 4 representam as imagens de densidade de lineamento interpolada pela krigagem ordinária com os lineamentos geológicos, que indicam a capacidade de maior ou menor capacidade da infiltração da água. Os tons de cinza mais claros representam áreas de maiores densidades e as menores densidades são apresentadas em tons de cinza mais escuros (Figura 3) e, respectivamente para a figura 4, as cores avermelhada-alaranjadas (maiores densidades) e cores azulada-esverdeadas (menores densidades). É importante ressaltar que o processo de krigagem considerou duas propriedades importantes da porosidade secundária, o tamanho e a distância entre os lineamentos, interpretados como conjunto de juntas. A espessura e o cruzamento das juntas, no entanto, não foi levada em consideração. Relembrando que essas quatro propriedades definem a eficiência da infiltração e percolação interna da água (permeabilidade).

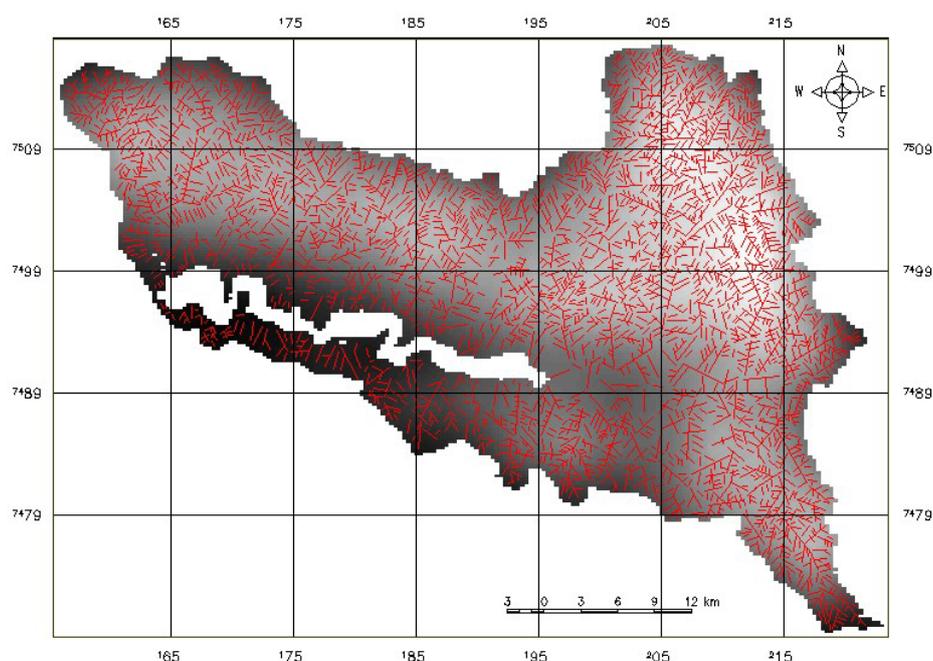


Figura 3 – Imagem interpolada em nível de cinza da densidade de lineamento geológico da área de estudo.

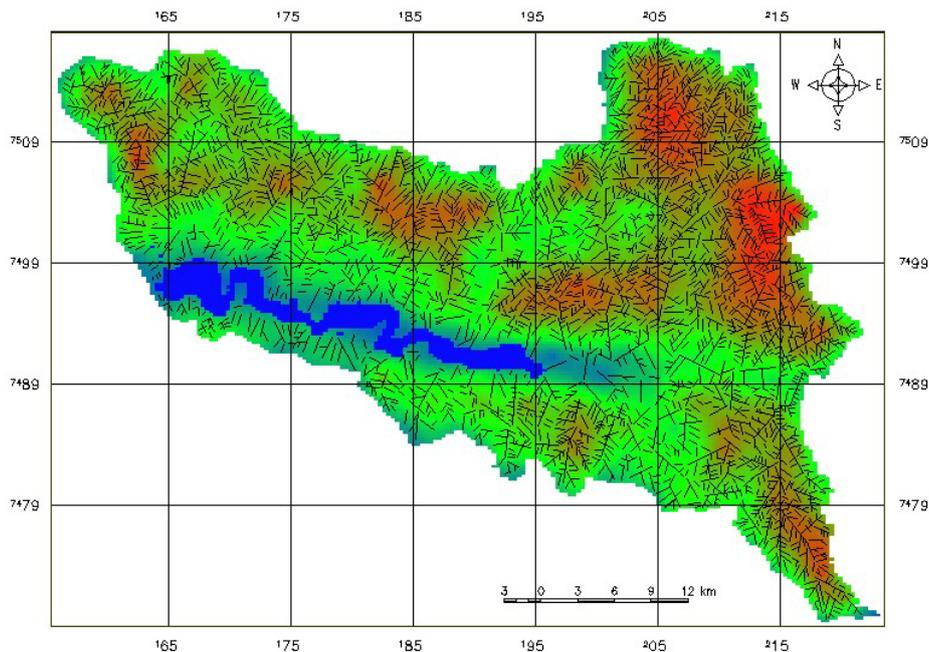


Figura 4 – Imagem interpolada colorida da densidade de lineamento geológico da área de estudo.

A figura 5 exibe as quatro classes de densidade de lineamento geológico, após o fatiamento, a equalização do histograma e a vetorização automática. No processo de vetorização, para que não ocorra o “efeito escada”, típico dessa transformação, aplicou-se a suavização das linhas de contorno com o interpolador bicúbico. Sem levar em consideração a área da Represa de Barra Bonita, a área total possui 1.461 km<sup>2</sup>, assim, a classe de alta densidade de lineamento possui 224 km<sup>2</sup> (15%); as classes medianamente alta e medianamente baixa totalizam 627 km<sup>2</sup> (43%) e 401 km<sup>2</sup> (28%), respectivamente; e a classe de baixa densidade apresenta 209 km<sup>2</sup> (14%). Estas quatro classes possuem 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 lineamento geológico, entre 4.062 e 4.851.

A figura 6 representa a imagem de altitude estrutural MNT e da forma como foi gerado esse produto, exposto no item anterior, a representação do terreno em três dimensões, salvo as limitações inerentes, representa com alta precisão o modelado da superfície. A figura 7 mostra as quatro classes de altitude estrutural, após o fatiamento, a equalização do histograma e vetorização automática com suavização das linhas de contorno. Pode ser visto a potencialidade intercâmbio das geoinformações por ferramentas de geoprocessamento. Os dados originais TIN (visualizados por triângulos) e amostras (curvas de nível e pontos cotados foram transformados em dados imagens e finalizaram como dados temáticos matricial e vetorial. A classe alto estrutural possui 84 km<sup>2</sup> (5%), as classes moderadamente alto e moderadamente baixo totalizam 241 km<sup>2</sup> (17%) e 977 km<sup>2</sup> (67%) e a classe baixo estrutural representa 160 km<sup>2</sup> (11%).

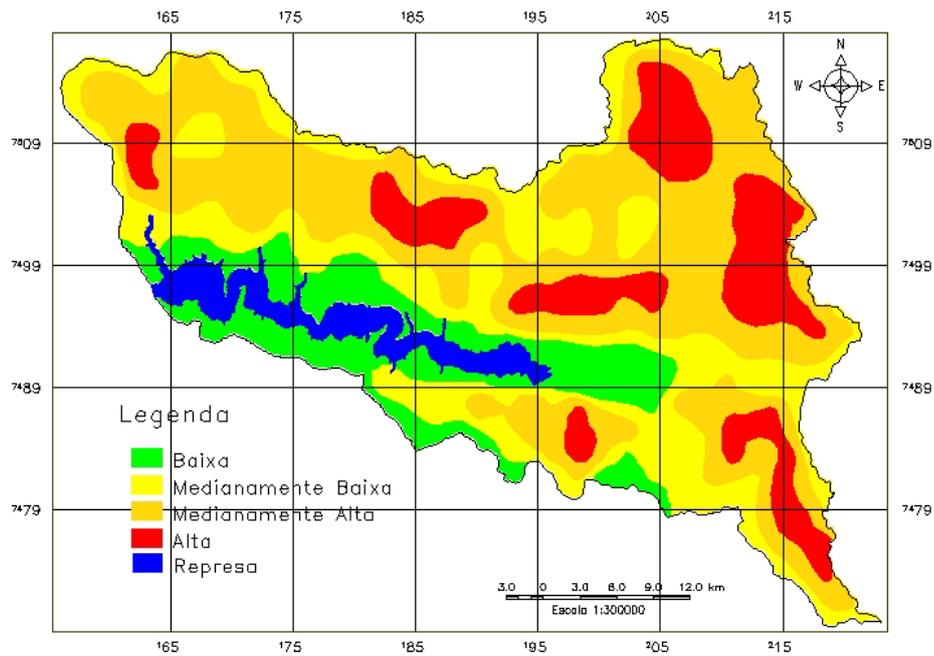


Figura 5 - Mapa de densidade de lineamento da Sub-bacia do Baixo Piracicaba-SP, após o fatiamento, equalização do histograma e vetorização automática com suavização das linhas de contorno.

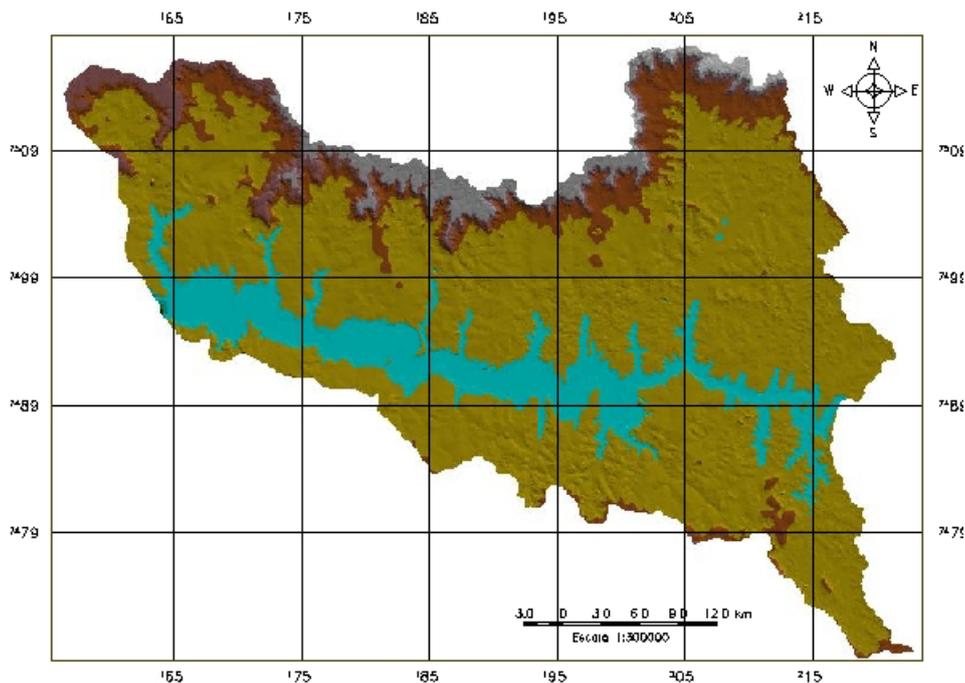


Figura 6 – Imagem MNT da altitude estrutural da área de estudo, após o fatiamento, equalização do histograma e vetorização automática com suavização das linhas de contorno.

A figura 8 exibe o mapa de favorabilidade à recarga ou descarga de água na Sub-bacia do Baixo Piracicaba. As classes favoráveis à recarga e à descarga possuem 694 km<sup>2</sup> (47%) e 433km<sup>2</sup> (30%), respectivamente, e as classes moderadamente favoráveis à recarga e descarga, 119 km<sup>2</sup> (8%) e 219 km<sup>2</sup> (15%), respectivamente. No total são 55% de áreas mais susceptíveis à entrada de água e 45%, à saída de águas subterrâneas.

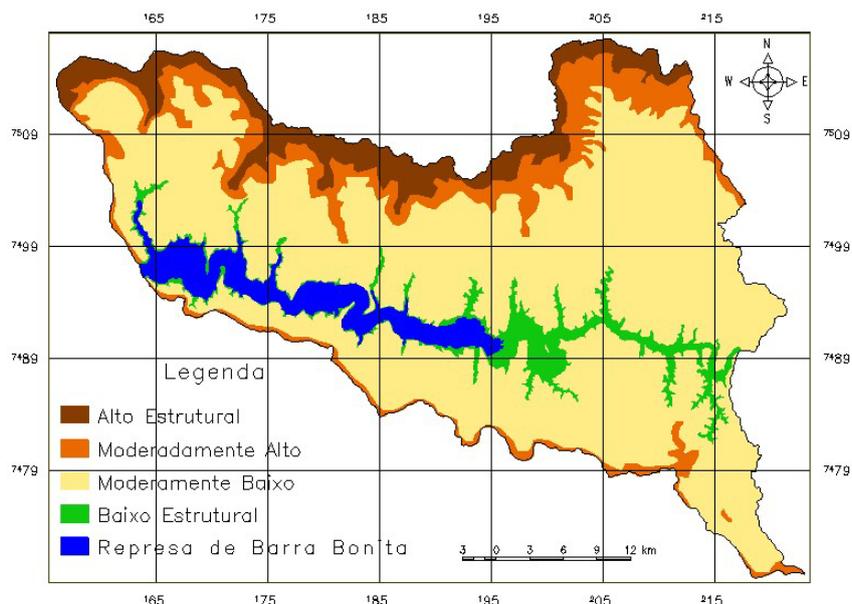


Figura 7 - Mapa de altitude estrutural da Sub-bacia do Baixo Piracicaba-SP, após o fatiamento, equalização do histograma e vetorização automática com suavização das linhas de contorno.

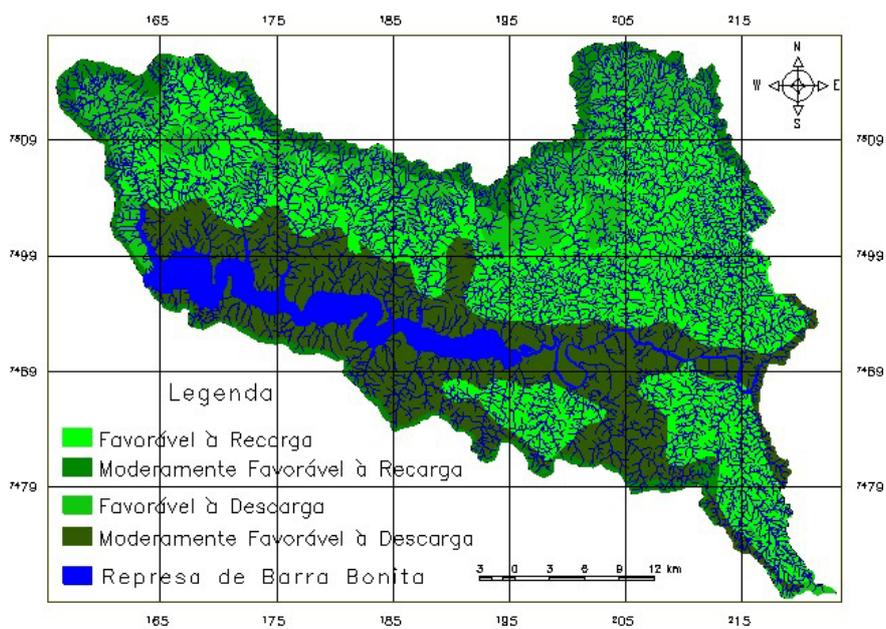


Figura 8 - Mapa de favorabilidade à recarga e descarga de água subterrânea da Sub-bacia do Baixo Piracicaba-SP.

As regiões favoráveis à recarga de água subterrânea ocorrem preferencialmente nas áreas de moderadamente baixo estrutural com declividades de superiores a 10% e com alta a medianamente alta densidade de lineamento; por sua vez, as regiões moderadamente favoráveis à recarga se dão, preferencialmente, nas classes alto estrutural (declividade variando entre 0 e 5%) e com medianamente alta a baixa densidade de lineamento. As regiões favoráveis à descarga ocorrem preferencialmente nas áreas moderadamente alto estrutural com declividades atingindo até 45% e com medianamente alta a medianamente baixa densidade de lineamento. Por outro lado, as regiões moderadamente favoráveis à descarga se dão, preferencialmente, nas classes moderadamente baixo

estrutural com declividades variando entre 0 e 10% e com baixa e medianamente baixa densidade de lineamento.

É importante ressaltar que o produto gerado (mapa de favorabilidade à recarga e descarga de água subterrânea da Sub-bacia do Baixo Piracicaba-SP) é um subsídio para direcionar um mapeamento mais detalhado, na escala de 1:10.000 ou maiores, para definir os locais apropriados para a realização de poços de captação de águas subterrâneas, visando a irrigação da cultura canavieira e aumentar a produção da agroindústria. Nesse sentido recomenda-se o emprego de imagens de alta resolução (4m nas imagens multiespectrais e 0,5m na pancromática), vendidas por quilômetro quadrado. A minimização dos custos dessas imagens e do trabalho de campo se dá pela aquisição de imagens que cobrem somente as áreas de interesse, definidas a partir do produto final gerado nesse trabalho.

#### **4 - CONCLUSÃO**

O método constitui uma abordagem eficiente no processo de inferência espacial no mapeamento de áreas favoráveis à recarga e descarga de águas subterrâneas. Numa escala regional, apesar da perda na precisão, a identificação dessas áreas ganha uma representatividade maior, alcançando rapidez e minimizando custos. A possibilidade do emprego desta técnica é indicada em terrenos sedimentares fissurados recobertos por praticamente uma litologia e em escala regional. O produto gerado é uma importante ferramenta de subsídio aos produtores de cana-de-açúcar da área de estudo para o investimento nessas áreas favoráveis à prospecção de água subterrânea, haja vista que a estrutura produtiva da região depende da constante irrigação e reserva de água subterrânea. Em qualquer ciência, o desenvolvimento de novas tecnologias não é importante por si só, mas sim por permitir novas descobertas que estimulem o progresso científico. Assim, as metodologias associadas às geotecnologias em hidrogeologia com integração de geoinformações estão sendo cada vez mais aprimoradas e diversificadas, tanto em ambientes geológicos.

#### **BIBLIOGRAFIA**

- CÂMARA, G; SOUZA, R.C. M.; FREITAS, U. M.; (1996) *SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling*. Journal of Computers & Graphics, pp. 395-403.
- CAVALLI, A. C. (1999) *Utilização de dados espectrais dos sensores TM/Landsat e AVHRR/NOAA-14 como indicadores de processos de degradação do solo*. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 1999. 153p.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1996). *Indicadores naturais para estudos de sistemas geoambientais* in Anais do I Simpósio Nacional de Geomorfologia, Uberlândia, out. 1996, 1, pp.13-19.
- LANDIM, P.M.B. (2006). *Sobre geoestatística e mapa*. Terra e Didática 2(1), pp.19-33.
- LIU, C. C. (1987) *A geologia estrutural do estado do Rio de Janeiro vista através de imagens do Landsat* in Anais do I Simpósio de Geologia Regional, Rio de Janeiro, ago. 1987, 1, pp. 164-189.