

## Uso de Geotecnologias e Análise de Multicritério para Mapeamento de Recarga Hidrogeológica da Região Sul Fluminense do RJ

Cassia Lima Cardozo<sup>1</sup>  
Luana Alves de Lima<sup>1</sup>  
Ludmilla Fernandes Alves<sup>1</sup>  
Ayrton Oliveira Neres<sup>1</sup>  
Juliana Magalhães Menezes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ/LABGIS  
(Laboratório de Geotecnologias)  
Rua São Francisco Xavier, 524, 2, Maracanã – Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
{cassia, alveslf, ayrtonneres, luanalima}@labgis.uerj.br

<sup>2</sup> Instituto de Ciências da Sociedade e Desenvolvimento Regional  
(Curso de Geografia) da Universidade Federal Fluminense - UFF  
Rua José do Patrocínio, 71, 28010-385, Centro, Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil  
juliana\_menezes@id.uff.br

**Abstract.** The popularization of geotechnologies in hydrogeological research helps the scientific community in the expansion and improvement of several studies that assist the decision making for groundwater managers. The present research aims to apply GIS tools to compose a model to estimate groundwater recharge based on multicriteria analysis. Moreover, it aims to implement the methodology proposed in the recharge determination of the Sul Fluminense Region of Rio de Janeiro State. The methodology was based on evaluation of several factors that influence the recharge by the hydrogeological knowledge. The model variables involved are: rainfall, soils, slope, and fracturing density, which were manipulated and stored in a Geographic Information System (Arc GIS desktop 9.3) to compose the recharge matrix from a Georeferenced Database. The final data recharging were confronted with average well water flow rate of the study area cities to validate the model. It was concluded that the rainfall variable has greater impact in the final result, where the higher rainfall areas coincided with high recharge areas associated with the mountainous regions and the highest flow rates have located in the “moderate” and “high” classes of final recharge mapping. The methodology proposed has proved effective to determine the recharge of the Sul Fluminense region of Rio de Janeiro, representing a good method for management actions at low cost.

**Palavras-chave:** groundwater recharge, multicriteria analysis, Geographic Information System, well water flow rate, recarga da água subterrânea, análise de multicritério, sistema de informação geográfica, vazão de água de poços.

### 1. Introdução

A utilização de geotecnologias e ambiente SIG no processamento de dados hidrogeológicos ganha, a cada dia, novos adeptos no meio científico, em sua maioria estimulada pela versatilidade, facilidade e benefício que o sistema proporciona sobretudo na tomada de decisão, na facilidade gráfica de visualização e espacialização do dado, na automatização do monitoramento, e na melhoria da qualidade e precisão dos produtos gerados (Gomes, 2008).

No que se refere ao suporte à tomada de decisão, pesquisadores em hidrogeologia lançam mão de métodos que integram diversas variáveis relevantes do meio físico subterrâneo somadas às facilidades oferecidas pelas ferramentas do geoprocessamento. Nogueira & Soares (1996), Barreto et al. (2000), Vidal et al. (2005), Lima (2009) desenvolveram estudos de análise de multicritério em ambiente SIG para determinar a potencialidade hídrica subterrânea. Já Aller et al. (1985) desenvolveram modelo qualitativo de mapeamento da poluição potencial com base em múltiplos parâmetros físicos do aquífero. Foster & Hirata

(1988) conceituam o mapeamento de risco à poluição do aquífero tomando como base o cruzamento de mapeamentos vulnerabilidade com o uso do solo. O que é importante nesses estudos é a escolha do método de análise multicriterial a ser aplicado, somado aos conhecimentos práticos e teóricos do pesquisador, que avalia e pondera os fatores ou temas relevantes no estudo e na escolha das ferramentas de geotecnologias a serem utilizadas.

Dentre as aplicações nos estudos da água subterrânea destaca-se o mapeamento de recarga do aquífero. Barreto et al.(2000) define a recarga do aquífero como sendo a água que entra na zona saturada principalmente da infiltração vertical proveniente da zona vadosa. Dessa forma, a recarga pode ser definida como a área por onde ocorre o abastecimento do aquífero. Lima (2009) apresenta o mapeamento da recarga como relevante na avaliação da favorabilidade e vulnerabilidade hidrogeológica utilizando um modelo de ponderação de fatores como: o tipo de solo, espessura do manto de alteração, superfície potenciométrica e compartimentação geomorfológica. Já Seabra et al. (2008) e Al- addamat et al. (2003) propuseram uma estimativa da recarga analisando os solos, declividade e chuvas.

O presente trabalho tem como objetivo aplicar uma metodologia de determinação de recarga de aquíferos utilizando sistemas de informação geográfica e análise de multicritério tendo como área piloto a região Sul Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, além de fornecer como produto final o mapeamento de recarga que sirva de subsídio à tomada de decisão em estudos hidrogeológicos na região.

## 2. Área de Estudo

A área de estudo compreende todo o Sul Fluminense do Estado do Rio de Janeiro composto pelos municípios de Angra dos Reis, Barra Mansa, Barra do Piraí, Itatiaia, Parati, Pinheiral, Piraí, Porto Real, Quatis, Resende, Rio Claro, Rio das Flores, Valença e Volta Redonda. (Figura 1)

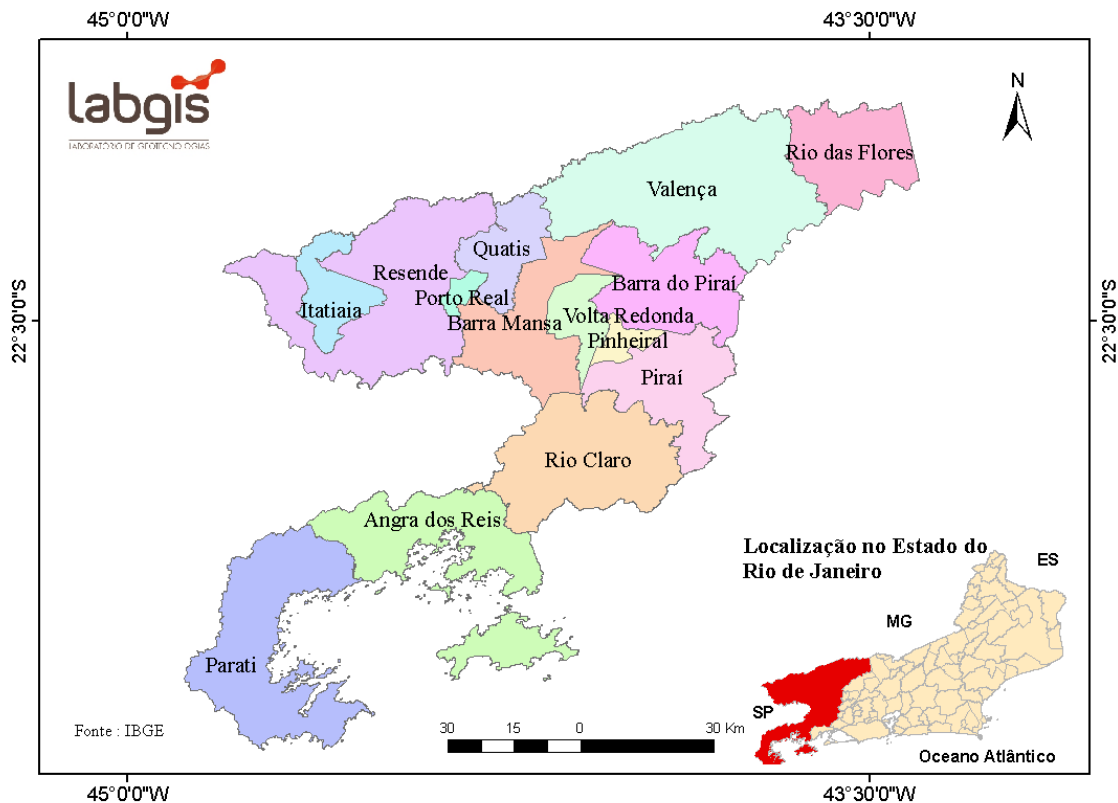


Figura1. Mapa de Localização da Região Sul Fluminense do Estado do Rio de Janeiro.

A Região Sul Fluminense engloba uma diversidade de feições geomorfológicas intimamente ligadas à geologia. O mapeamento fornecido pelo do CPRM (Centro de Pesquisa de Recursos Minerais) para o Estado do Rio de Janeiro indica os seguintes Domínios Morfoestruturais para a região de estudo: Maciços Costeiros e Interiores, Escarpas Serranas, Planaltos Residuais, Depressões Interplanálticas, Depressões Interplanálticas com Alinhamentos, Tabuleiros e Bacias Sedimentares eo-cenozóicas e Planícies Flúvio- Marinhas (baixadas).

Barreto et al.(2000) definem dois domínios hidrogeológicos principais para o Estado do Rio de Janeiro: o Sistema aquífero Cristalino (SAC) onde a potencialidade hídrica é subordinada pelo grau de fraturamento das rochas pré-cambrianas, correspondendo a 80% do Estado e o Sistema aquífero sedimentar correspondente a 20% dos aquíferos do Estado relacionados a planícies fluviais, flúvio-marinhas e lagunares.

A região Sul Fluminense é composta majoritariamente pelo SAC, sendo secundária a ocorrência de aquíferos sedimentares, localmente representados pelas Bacias de *Rift* de interior intracratônico de Resende e Volta Redonda, e pelas baixadas litorâneas condicionadas pela sedimentação fluvial.

### 3. Metodologia

O modelo desenvolvido e aplicado é baseado em conhecimento empírico, das evidências ou fatores influentes na recarga. Nesse sentido a primeira etapa do trabalho consistiu na discussão dos possíveis fatores condicionantes para a Recarga de um aquífero, seguida de um levantamento bibliográfico que permitiu a obtenção dos temas abordados. Dessa forma serão listadas a seguir as variáveis envolvidas no modelo, sua relevância no estudo de recarga e a metodologia empregada na sua confecção e inclusão em ambiente *SIG*, no caso o *Arc GIS Desktop 9.3* da *ESRI*.

Declividade - consiste na inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, sua inclusão é justificada pela sua influência na velocidade de escoamento superficial das águas pluviais que tem relação direta com a taxa de infiltração. Neste trabalho a declividade foi extraída a partir de Modelo Digital de Elevação *SRTM (Shuttle Radar Topograph Mission)*, em escala equivalente a 1:250.000, obtida no site da Embrapa solos – Brasil em Revelo (Miranda et al., 2005). O mapa final de declividade expressa em porcentagem foi fatiada em 6 classes, como pode ser observado na Tabela 1.

Precipitação Pluviométrica - A precipitação pluvial pode ser considerada a principal fonte de recarga no ciclo hidrológico e por esse motivo um fator crucial para o modelo de recarga proposto. Os índices pluviométricos médios anuais de cada município do Sul Fluminense foram extraídos do banco de dados hidrológicos *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA). Para a criação da superfície de chuvas foi escolhido um ciclo hidrológico de 10 anos, buscou-se o período mais completo, que englobava o maior número de estações possíveis (1985 a 1995).

Solos - A presença de uma cobertura sedimentar ou solo sob o substrato cristalino pode favorecer ou não o processo de infiltração de águas meteóricas, influenciando nos estudos de recarga. Quanto mais espessas e permeáveis, melhores se acham as condições de infiltração. O mapa de solos foi obtido, na escala 1:500.000, é como parte integrante do Projeto de mapeamento de Estado do Rio de Janeiro (Carvalho Filho et al., 2000). A extensão original em pdf foi georreferenciada e vetorizada em ambiente *SIG* para compor o modelo proposto.

Lineamentos Morfoestruturais e Densidade de Fraturamento – Como a maior parte da área de estudo pertence ao Sistema Aquífero Cristalino (SAC), essa variável se torna relevante no modelo de recarga proposto. As propriedades hidráulicas nos domínios fraturados são condicionadas por descontinuidades na rocha (falhas, fraturas e juntas) que ocorrem tanto em meso quanto em macro escala com o mesmo padrão e orientação resultante

do regime tectônico que atuou no terreno. Sendo assim, as feições topográficas assim como as drenagens auxiliam na determinação de lineamentos morfoestruturais. A partir do modelo de elevação obtido (SRTM) foram extraídas drenagens em escala compatível assim como imagens sombreadas nos azimutes 310° e 45°, ambos com uma altura de iluminação de 45° a fim de evidenciar estruturas em mais de uma família de orientação. Em ambiente SIG os lineamentos morfoestruturais foram vetorizados com a interpretação dos padrões de drenagem e as imagens sombreadas.

Após a etapa de aquisição e inclusão dos dados obtidos em um banco de dados geográficos foi possível a criação da matriz de recarga final. O método de análise multicriterial escolhido denomina-se Combinação Linear Ponderada – *WLC* (*Weight Linear Combination*) que consiste na atribuição de pesos a cada um dos fatores, segundo as regras de decisão previamente definidas, expressa na equação abaixo (Equação 1):

$$\text{Índice de Recarga} = (P_{\text{solos}} \times N_{\text{solos}}) + (P_{\text{declividade}} \times N_{\text{declividade}}) + (P_{\text{densidade de fraturamento}} \times N_{\text{densidade de fraturamento}}) + (P_{\text{Precipitação Pluviométrica}} \times N_{\text{Precipitação Pluviométrica}}) \quad (1)$$

Onde P é o peso atribuído à variável e N é a nota da classe de cada variável. O método de ponderação utilizado necessita que as classes sejam normalizadas para um intervalo ou escala numérica ordinal. Os pesos das variáveis e suas respectivas classes variam de 0 a 10 de acordo com o grau de importância para recarga aquífera obedecendo a escala ordinal de ponderação abaixo ( Figura 2):

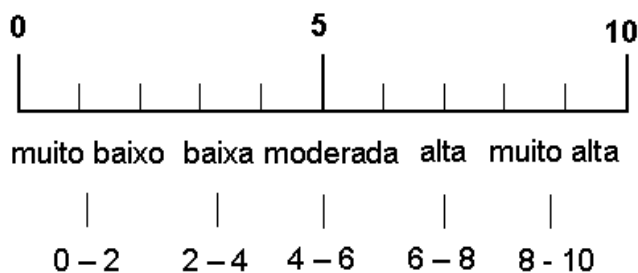


Figura 2 – Escala ordinal utilizada para a ponderação das variáveis e classes do modelo de recarga.

A última etapa de trabalho consistiu na análise e aferição do modelo. Segundo Gomes (2008), a primeira condição para que o modelo seja considerado eficiente é que ao ser incluído ao processo de tomada de decisão apresente resultados positivos. Segundo Lima (2007) as zonas que apresentam maior recarga podem ser definidas como áreas de maior favorabilidade à exploração de água subterrânea. Nesse sentido foram utilizados para a aferição do modelo dados obtidos no Guia de Poços Tubulares fornecido pelo Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio (DRM-RJ) que apresenta uma listagem das vazões médias de poços no cristalino dos municípios do RJ.

A seguir é apresentada a matriz de recarga final com os pesos e classes atribuídas (Tabela 1), em seguida na Figura 3 é apresentado o fluxograma de atividades empregado no projeto incluindo as principais ferramentas utilizadas no processamento dos dados em ambiente SIG.

Tabela 1. Matriz de Recarga Final.

<b>Chuvas (mm/ano) Peso: 9</b>	<b>Nota</b>	<b>Tema: Solos Peso: 6</b>	<b>Nota</b>
<1200	2	Cambissolo Álico	7
1200-1300	3	Latossolo Vermelho-Amarelo Álico	7
1300-1400	4	Afloramento de Rocha	1
1400-1500	5	Cambissolo Eutrófico	7
1500-1600	6	Latossolo Amarelo Álico	7
1600-1700	7	Podzol Hidromórfico Distrófico	5
1700-1800	8	Podzólico Vermelho Amarelo	5
1800-1900	9	Solos aluviais distróficos	6
>1900	10	Solos aluviais eutróficos	4
		Solos indiscriminados de mangue	4
		Solos litólicos álicos	3
		Área de intervenção antrópica	1
<b>Declividade (%) Peso: 7</b>	<b>Nota</b>	<b>Densidade de Fraturas Peso:5</b>	<b>Nota</b>
Relevo Plano (0-3%)	9	Substrato Muito Fraturado	9
Relevo Suavemente Ondulado	7	Substrato Fraturado	8
Relevo Ondulado (8-20%)	6	Substrato Moderadamente Fraturado	5
Relevo Fortemente Ondulado (	4	Substrato Pouco Fraturado	3
Relevo Montanhoso (45-75%)	2	Substrato Muito Pouco Fraturado	1
Relevo Fortemente Montanhos	1		

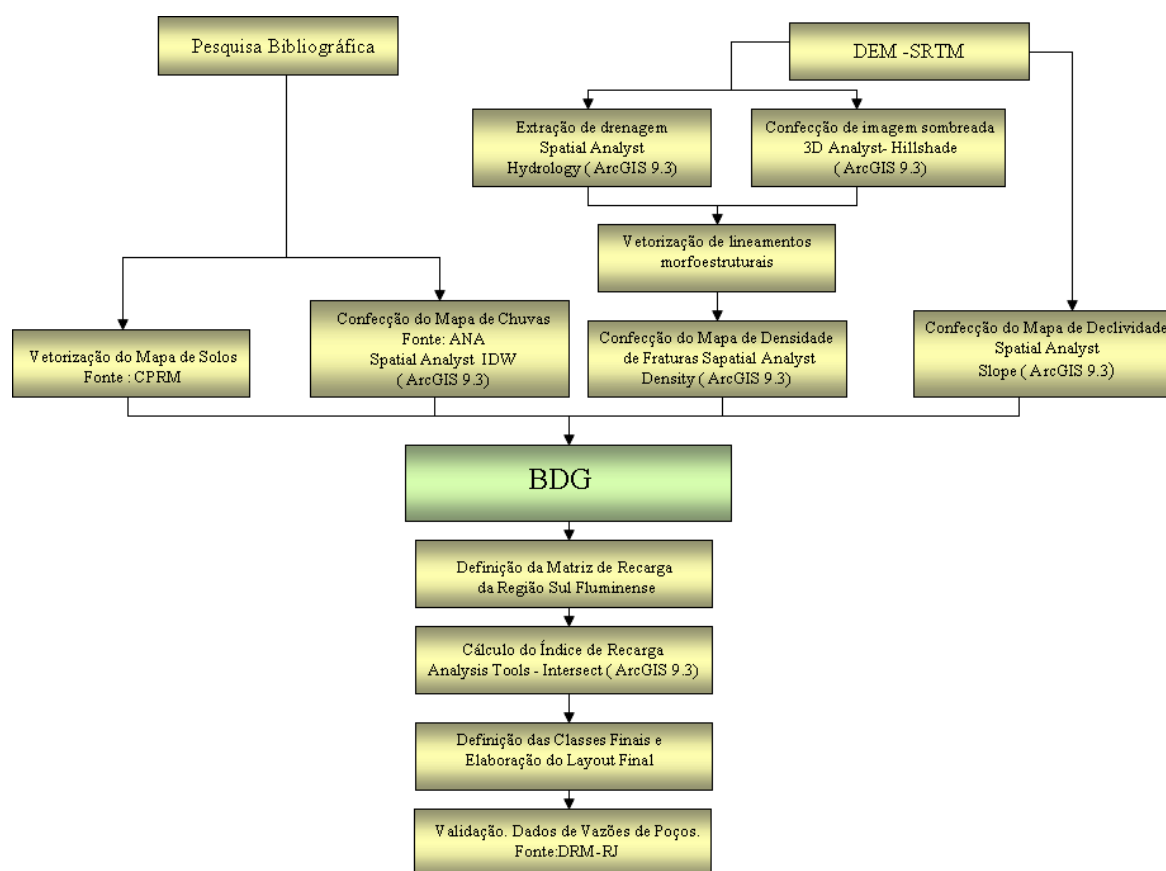


Figura 3. Fluxograma de Atividades.

#### 4. Resultados e Discussões

O modelo proposto utilizado para a elaboração do Mapa de Recarga da Região Sul Fluminense teve como Resultante a Figura 4, que apresenta as classes relativas de Recarga como resultado final. Os valores resultantes do cálculo do índice apresentaram valor mínimo de 97 e máximo de 221 e foram divididos em 5 classes relativas de recarga pelo método estatístico de quebras naturais. Como resultado pode-se afirmar que 80% da Região Sul Fluminense está inserida nas Classes de Recarga Moderada a Muito Elevada. As classes Recarga Baixa a Muito Baixa correspondem a 20% da Região. De modo geral o resultado indica relativa disponibilidade hídrica no Sul do Estado.

As áreas indicadas pelo modelo como de recarga alta a muito alta foram fortemente influenciadas pela variável chuva, por esta apresentar maior peso. Os municípios de Quatis, Resende e Itatiaia por apresentarem maior média de pluviosidade anual se configuram como uma das regiões de maior entrada de água no sistema aquífero cristalino. Isso se deve às altas altitudes representadas pelo maciço de Itatiaia e da Serra da Mantiqueira. Igualmente, a região de Paraty e Angra dos Reis por apresentar alto índice pluviométrico é contemplada com as classes de recarga alta a muito alta devido a presença da Serra do Mar nesta localidade. Esse fato é ratificado quando comparado com os dados de vazão média dos poços por município que apresentam Resende, Porto Real, Volta Redonda e Quatis com elevadas vazões.

As áreas indicadas com recarga baixa a muito baixa igualmente se relacionam com a variável precipitação por apresentarem menores índices de acordo com o dado utilizado.

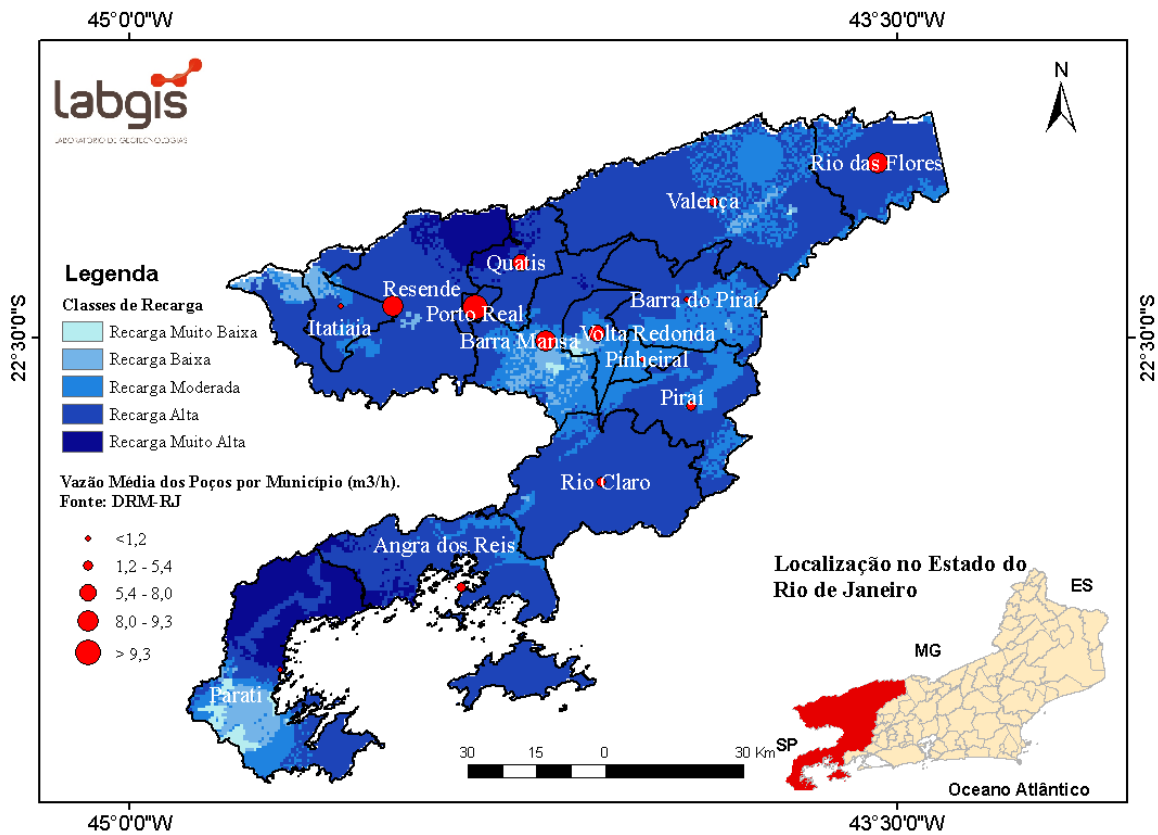


Figura 4. Mapa de Recarga Final da Região Sul Fluminense do Estado do Rio de Janeiro

## 5. Conclusões

A metodologia empregada utilizando SIG no estudo de recarga de aquíferos se mostrou satisfatória. No entanto ainda se acha necessário aprimorar os estudos nessa temática com a finalidade de fornecer dados coerentes com a realidade. Esse melhoramento se refere à aquisição de dados mais completos, assim como na discussão da ponderação das variáveis, bem como dos métodos de validação.

As variáveis utilizadas, densidade de fraturamento, solos, declividade e chuvas se mostraram eficientes no modelo, destacando-se o elevado peso atribuído às chuvas, por ser considerado o fator mais decisivo no resultado final.

O cruzamento com os dados de vazões de poços se mostrou útil para a validação do modelo, entretanto a inexistência de dados em alguns municípios dificultou a melhor análise.

A metodologia elaborada pode ser considerada uma boa alternativa de baixo custo para estimativa de recarga.

## 6. Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Águas – ANA. Sistemas de Informações hidrológicas. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>. Acesso em: 11 jan. 2010.

Al-Adamat, R.A.N.; Foster, I.D.L.; Baban, S.M.J. Groundwater Vulnerability and Riskmapping for the Basaltic Aquifer of the Azraq Basin of Jordan Using GIS, Remote Sensing and DRASRIC. **Applied Geography**, v. 23, 303-304, 2003.

Aller, L.; Bennet, T.; Leher, J.; Petty, R.. **DRASTIC: A standardized system for evaluation groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. 1985. USEPA Report .600/2-85/018.

Barreto, A. C. DA C.; Monsores, A.L.M.; Leal, A. de S.; Pimentel, J. 2000. **Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro-Texto Explicativo do Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro**. CPRM/DRM.

Capucci, E; Martins, A.M; Mansur, K.L; Monsores, A.L.; **Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas. Orientação aos usuários**. Departamento de Recursos Minerais. DRM-RJ. Rio De Janeiro, 2001.67p.

Carvalho Filho, A.; Lumbreras, J.F.; Lemos, A.L.; Santos, R.D.; Calderano Filho, B.; Wittern, K.P. Projeto Rio de Janeiro: Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro. 1:500.000. CPRM, 2000.

Foster, S.; Hirata, R. 1988. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81p.

Gomes, F.E.M.; 2008. Geoprocessamento em ambiente SIG aplicado à hidrogeologia. In: Feitosa, F. A. C. & Filho J. M. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Edição Revisada e Ampliada Fortaleza: CPRM, 2008, ii, p. 133-174.

Lima, L.A. DE. Favorabilidade Hidrogeológica para Aquíferos Fraturados: Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos/RJ. 40p. Monografia de conclusão de curso (Geologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro. 2007.

Lima, L.A. DE. Vulnerabilidade Geral de Aquíferos Fraturados: Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos – São José de Ubá/RJ. 118p. Dissertação de Mestrado (Geologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro. 2009.

Miranda, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

Nogueira, F. J.; Soares, P. C. Análise da distribuição da água subterrânea em Curitiba através de ferramentas de geoprocessamento. In : GIS Brasil, Curitiba, 1996, **Anais**.12p.

Seabra, V. S.; Silva Júnior, G.C.; Cruz, C.B.M. The Use of Geoprocessing to Assess Vulnerability on the East Coast Aquifers of Rio de Janeiro State, Brazil. **Environmental Geology** (Berlin), v. 55, p. 1345-6, 2008.

Vidal, C. A.; Rostirolla, S. P.; Kiang, C. H. 2005. Análise de favorabilidade para a exploração de água subterrânea na região do médio rio Tietê, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**. p. 475-481.