

Mapeamento da recarga de águas subterrâneas a partir da regionalização de estimativas pontuais via regressão múltipla espacial

Ronaldo Medeiros dos Santos^{1,2}
Sergio Koide¹

¹Universidade de Brasília - UnB
Depto. Engenharia Civil e Ambiental - Campus Darcy Ribeiro - Brasília - DF, Brasil
skoide@unb.br

²Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Campus Salinas - IFNMG
Fazenda Varginha, Km 02, Rodovia MG-404. CEP: 39560-000. Salinas – MG, Brasil
ronaldoenge@yahoo.com.br

Abstract. Spatial pattern of groundwater recharge is an important data to groundwater and surface water management. Generally, the traditional approach used is based on distributed hydrologic models, which requires large quantity of physical data. Thus, the proposition of alternative methods remains justifiable. In this way, the goal of the present work was to test a multiple linear regression model to groundwater recharge mapping using local recharges rates samples, obtained by means of water table fluctuation method. In the methodology, the local recharge rates samples was defined as an dependent variable in relation to the spatial distributions of many environmental factors, considered determinants in the process. The model constructed was then applied to the groundwater recharge regionalization, now using spatial distribution of the factors as input data. The “R” coefficient of the model was 0,99 and the resultant mapping showed best spatial consistence in comparing with the result of the IDW interpolator application. The model can’t be used to groundwater recharge prediction, because the independent variables considered are not time variants and the time period of analyze is to short. If such limitations are solved, the model can be applied for this purpose.

Palavras-chave: groundwater recharge mapping, multiple linear regression model, mapeamento da recarga de águas subterrâneas, modelo de regressão linear múltipla.

1. Introdução

Dos processos responsáveis pela recarga de aquíferos, a infiltração e percolação das águas advindas da precipitação estão entre os principais (Xu e Beekman, 2003). Esses processos são regulados por variáveis e fatores ambientais que podem apresentar alto grau de variabilidade espacial, fazendo com que o potencial das áreas à geração de recarga também seja espacialmente diferenciado.

Por essa razão, a reserva hídrica disponível em uma região ou bacia hidrográfica pode ser o resultado do aporte ocorrido em áreas específicas, por vezes de extensão superficial limitada. O conhecimento de tais áreas, assim como também daquelas com baixo potencial de recarga, é de fundamental importância à gestão ambiental e dos recursos hídricos, tanto subterrâneos quanto superficiais.

O mapeamento da recarga de águas subterrâneas, geralmente, compreende um dos resultados da aplicação de modelos hidrológicos distribuídos, que exigem um grande volume de informações e dados de campo. Existem, no entanto, formas alternativas, a partir das quais é possível se conhecer a variabilidade espacial do referido processo.

Klock e Udluft (2002) efetuaram o mapeamento da recarga regionalizando estimativas pontuais, obtidas por balanço de massa de cloretos, analisando-se a sua relação com a distribuição espacial do uso e cobertura do solo, por sua vez efetuada com o auxílio de imagens orbitais de sensoriamento remoto. No caso de Braun *et al.* (2003), foi sugerida uma forma de combinação linear ponderada, semelhante ao índice de vulnerabilidade de aquíferos “DRASTIC”, considerando como fatores o potencial de geração de escoamento superficial, a percolação e a evapotranspiração. Em oliveira e Ferreira (2001), o potencial de recarga foi expresso por meio de um índice de infiltração máxima, obtido a partir de combinação linear

ponderada entre tipo de solo, declividade, e capacidade máxima de armazenamento de água do solo.

Nos três casos citados observou-se um mesmo problema, frequentemente associado à validade de mapeamentos efetuados com auxílio de sistemas de informações geográficas: a subjetividade. No primeiro caso, a regionalização dos valores pontuais de recarga foi efetuada manualmente, desprezando-se outros fatores potencialmente determinantes, como o tipo de solo e a declividade. Quanto aos dois últimos, o processo de atribuição dos coeficientes de ponderação é empírico e subjetivo, podendo gerar resultados distintos para um mesmo estudo, se efetuado por analistas diferentes.

Um outro meio de se caracterizar espacialmente a recarga consiste na interpolação de estimativas obtidas pontualmente. No entanto, o desempenho de interpoladores depende da quantidade e da distribuição espacial das “amostras”, que, em se tratando de recarga, são geralmente escassas. Além disso, alguns fatores associados ao referido processo podem se distribuir espacialmente sob a forma de zonas, o que pode impedir a utilização de interpoladores cuja premissa básica de aplicação seja a correlação espacial por distância, como o *Kriging*.

Diante do contexto ora exposto e como proposta de solução às deficiências dos métodos apresentados, o presente trabalho teve por objetivo sugerir um modelo, obtido por regressão múltipla linear, para a espacialização de estimativas pontuais de recarga de águas subterrâneas.

2. Material e Métodos

A área de estudos compreendeu a bacia do córrego Capão Comprido, afluente do Ribeirão das Pedras, que por sua vez deságua no lago Descoberto; formado pelo represamento do rio Descoberto. Encontra-se localizada entre os meridianos $48^{\circ}10'07''$ e $48^{\circ}06'13''$ de longitude oeste e os paralelos $15^{\circ}43'42''$ e $15^{\circ}45'41''$ de latitude sul, abrangendo uma área de aproximadamente 16 km^2 (Figura 1).

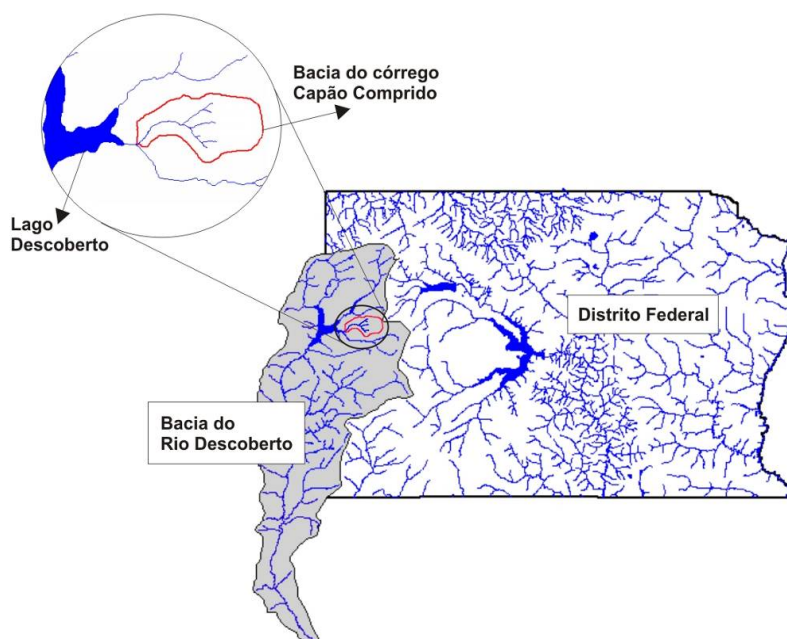


Figura 1. Localização da área de estudo

Os materiais e dados utilizados no desenvolvimento do presente trabalho podem ser agrupados em duas classes: dados físicos e dados cartográfico-espaciais, apresentados na Tabela 1, juntamente com a respectiva fonte de obtenção.

Tabela 1 – Materiais utilizados

Categoria	Fonte
Material Cartográfico	
• Altimetria	SICAD (Sistema Cartográfico do Distrito Federal).
• Geologia	IBGE-DSG (Brasil, 2003).
• Solos (mapeamento)	EMBRAPA (Reatto <i>et al.</i> , 2003).
• Hidrogeologia	IBGE-DSG (Brasil, 2003).
• Mapa do uso e cobertura do solo	Obtido por classificação automática de uma cena SPOT5/HRV multiespectral, com resolução espacial de 10m, adquirida pelo PTARH – UnB.
Dados de Campo	
• Piezometria	Piezômetros instalados e operados pelo PTARH – UnB.
• Coeficiente de produtividade específica do aquífero freático (S_y)	Resultados de testes de bombeamento e <i>slug tests</i> , efetuados na rede de piezômetros instalada na área de estudo.

A metodologia proposta teve como base a seguinte hipótese: sabendo-se que a recarga de águas subterrâneas é o resultado da interação entre vários fatores físico-climático-ambientais, espera-se que exista correlação estatística entre os diferentes valores das “amostras” e as combinações possíveis dos diferentes valores assumidos pelos fatores ambientais considerados determinantes ao processo.

Dessa forma, testou-se um modelo de regressão múltipla linear, do tipo “ $Y=a+b_1*x_1+b_2*x_2+b_3*x_3+...b_n*x_n$ ”, no qual as estimativas de recarga foram definidas como variável dependente em relação à distribuição espacial dos fatores selecionados. Construído o modelo, aplicou-se o mesmo aos mapas dos fatores, gerando-se assim um mapa final da distribuição espacial da recarga de águas subterrâneas para a área de estudo. Preliminarmente à construção e aplicação do modelo, foram percorridas as seguintes etapas metodológicas: a) obtenção das estimativas pontuais de recarga; b) seleção de fatores determinantes ao processo de recarga.

2.1. Obtenção das estimativas pontuais de recarga

De posse dos dados do monitoramento do nível freático, foram estimadas as elevações piezométricas resultantes do período de recarga durante a estação chuvosa do ano hidrológico 2008/2009. As elevações observadas em cada piezômetro de monitoramento (Figura 2) foram obtidas graficamente, correspondendo à distância vertical entre a carga piezométrica máxima e o prolongamento da linha de recessão da curva piezométrica, conforme método indicado por Healy e Cook (2002), ilustrado na Figura 3.

A recarga pontual, válida para o piezômetro de monitoramento onde se observou a elevação do nível freático, é estimada multiplicando-se a elevação total, em mm/ano, pelo valor local do coeficiente de produtividade específica, S_y , do aquífero (Healy e Cook, 2002), por sua vez estimado a partir de testes de bombeamento executados nos mesmos piezômetros.

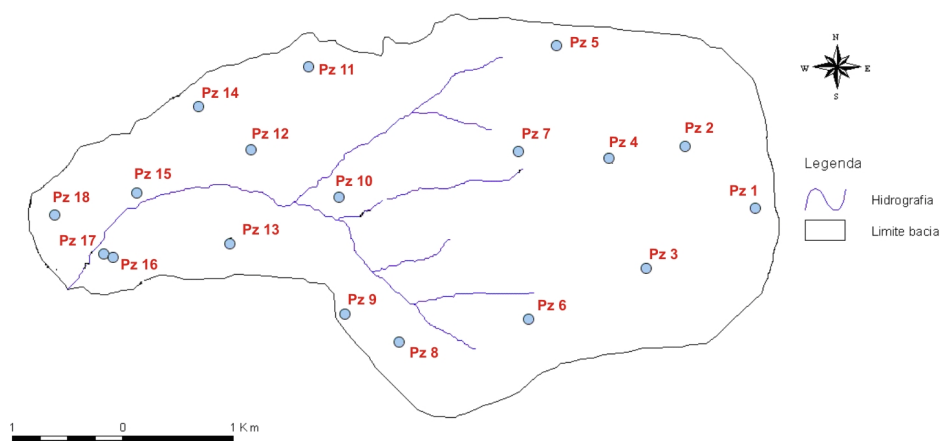


Figura 2. Localização das estimativas pontuais de recarga (piezômetros).

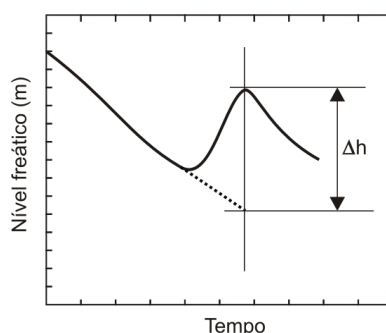


Figura 3. Determinação gráfica da elevação piezométrica no período de recarga (Fonte: Healy e Cook, 2002).

2.2. Seleção de fatores determinantes ao processo de recarga

Encontram-se apresentados na Tabela 2 os fatores considerados determinantes à recarga na área de estudo. Apresenta-se também alguns exemplos da natureza de sua relação com o processo em questão.

Tabela 2 – Fatores selecionados e sua influência no processo de recarga.

Fator	Influência no processo de recarga das águas subterrâneas
Declividade do terreno	Tem relação inversa com a favorabilidade à recarga. Quanto maior a declividade, menor a infiltração da água no solo e maior o escoamento superficial.
Uso e cobertura do solo	O uso e a cobertura do solo sintetizam uma série de fatos, diretamente relacionados à recarga, como áreas impermeáveis, que impedem a infiltração e favorecem o escoamento superficial, e o porte da cobertura vegetal, que influencia na interceptação e na evapotranspiração.
Tipo de solo (comportamento hidrológico)	A permeabilidade dos solos tem relação direta com a favorabilidade à recarga. Neste caso a permeabilidade foi inferida a partir do comportamento hidrológico dos solos, descrito na literatura, e de valores medidos de condutividade hidráulica saturada.
Comportamento hidrodinâmico do aquífero	A escala de grandeza dos parâmetros do aquífero tem relação direta com a favorabilidade à recarga. Quanto maiores os valores de condutividade hidráulica e do coeficiente de produtividade específica, S_y , maior a capacidade do aquífero em armazenar e transmitir água.

Tabela 2 – Continuação...

Espessura do aquífero freático	Tem relação direta com a favorabilidade à recarga. Quanto menor a espessura, menor a capacidade de armazenamento dos fluxos aportados via recarga.
Profundidade freática	Tem relação direta com a favorabilidade à recarga. Quanto menor a profundidade, maior a possibilidade de saturação da superfície e, conseqüentemente, maior a ocorrência de escoamento superficial.

Para cada fator selecionado foi gerado um mapa, cujos valores naturais de grandeza foram convertidos em escala contínua *fuzzy*, para padronizar os diferentes valores e unidades associados aos referidos fatores. Utilizando-se esses mapas, foram coletados valores médios dos fatores para cada localização correspondente a uma estimativa pontual da recarga. Com os valores dos fatores e com as estimativas pontuais de recarga, construiu-se então um modelo de regressão múltipla linear.

3. Resultados e Discussão

Apresenta-se na Tabela 3 as estimativas pontuais de recarga para o ano hidrológico 2008/2009, obtidas segundo o método apresentado na seção anterior. Também são apresentados valores de flutuações freáticas medidas nos piezômetros e o valor do coeficiente de produtividade específica (S_y).

Tabela 3 – Recarga de águas subterrâneas: método flutuação do nível freático.

Piezômetro	Flutuações freáticas positivas totais (m)	S_y médio (adimensional)	Recarga (mm/ano)
Pz 01	2,30	0,1100	253,00
Pz 02	2,00	0,1100	220,00
Pz 03	2,90	0,1100	319,00
Pz 04	2,60	0,1100	286,00
Pz 05	2,50	0,1100	275,00
Pz 06	4,10	0,1100	451,00
Pz 07	7,10	0,0500	355,00
Pz 08	11,40	0,0500	570,00
Pz 09	18,00	0,0135	243,00
Pz 10	5,10	0,0500	255,00
Pz 11	10,50	0,0135	141,75
Pz 12	7,60	0,0500	380,00
Pz 13	6,90	0,0580	398,00
Pz 14	7,10	0,0500	355,00
Pz 15	4,30	0,0500	215,00
Pz 16	6,50	0,0550	355,00
Pz 17	1,90	0,1550	294,50
Pz 18	5,60	0,1550	868,00

Aplicando-se as referidas estimativas e os valores médios dos fatores à análise de regressão múltipla linear, foi obtido um modelo, com a recarga expressa em função dos fatores selecionados, conforme apresentado na Equação 1.

$$R = 173,98 - 10,23D + 0,039Esp + 5,66Ksat + 6,18NF - 5,99Sy + 5,34US + 0.0029S \quad (1)$$

em que: D = declividade do terreno; Esp = espessura do aquífero freático; Ksat = condutividade hidráulica saturada média do aquífero freático; NF = profundidade freática; Sy = produtividade específica média do aquífero freático; US = uso e cobertura do solo (ranking das diferentes coberturas quanto ao favorecimento à recarga); S = tipo de solo (ranking dos diferentes tipo de solo quanto ao favorecimento à recarga).

O coeficiente de determinação (R) obtido foi de 0,99 e o mapa gerado a partir do modelo encontra-se apresentado na Figura 4.

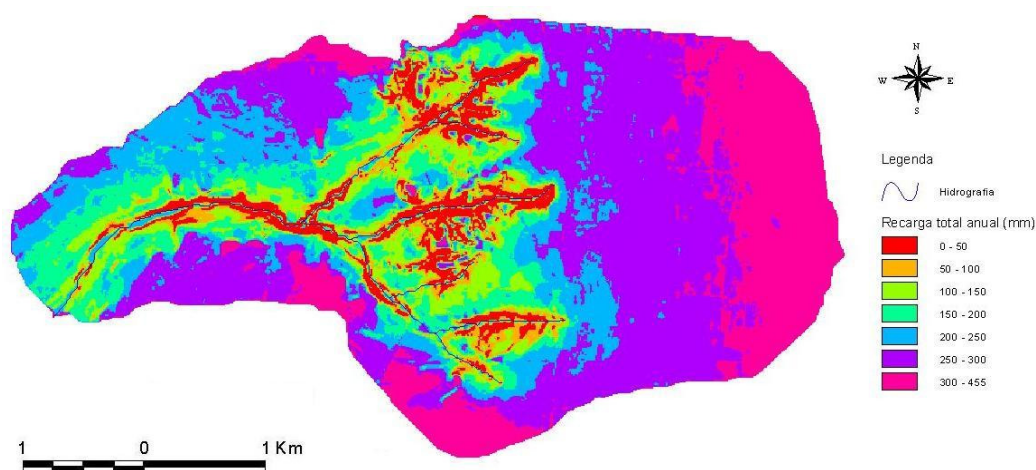


Figura 4. Distribuição espacial da recarga de águas subterrâneas na área de estudo, estimada a partir da regionalização de estimativas pontuais via modelo de regressão múltipla espacial.

O resultado da aplicação do modelo de regressão pode ser avaliado comparando-se o mapa com outra espacialização das mesmas estimativas pontuais de recarga, agora efetuada por meio de interpolação. Foi utilizado o interpolador *IDW* (inverso do quadrado da distância), cujo mapa resultante encontra-se apresentado na Figuras 5.

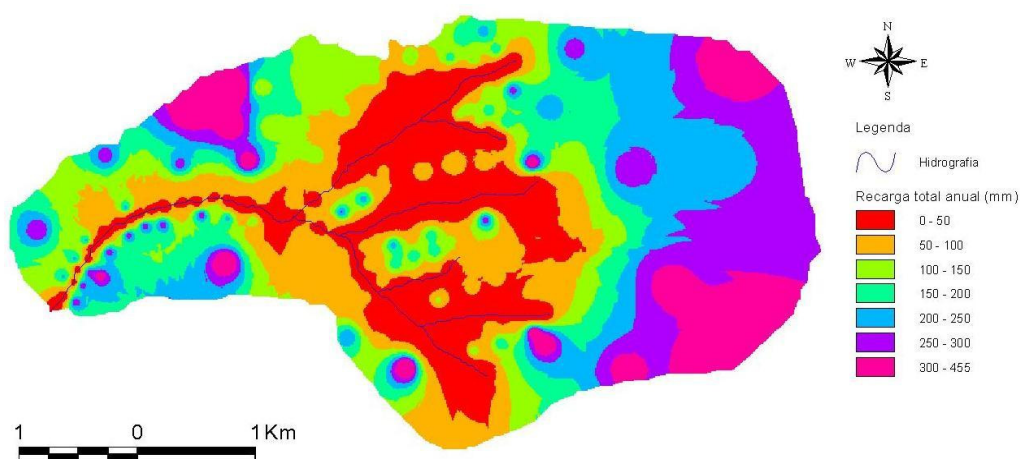


Figura 5 - Distribuição espacial da recarga de águas subterrâneas na área de estudo, estimada a partir da regionalização de estimativas pontuais via interpolação pelo método *IDW*.

Conforme se pode observar, o mapa interpolado apresenta padrões circulares artificiais, resultante da grande influência da estimativa pontual no processo de interpolação. Mesmo se densificando os pontos de amostras, a partir de inferências acerca da taxa de recarga para locais com características semelhantes às dos pontos monitorados, o interpolador não foi capaz de simular os padrões espaciais esperados para o processo; que devem ser uma espécie de mistura dos fatores determinantes, como o tipo de solo, a declividade e o uso e cobertura do solo, conforme apresentado pelo mapa obtido via modelo de regressão.

4. Conclusões

Levando-se em consideração o objetivo inicialmente proposto, chegou-se às seguintes conclusões:

- O modelo de regressão apresentou melhor desempenho à regionalização de estimativas pontuais de recarga que um interpolador clássico (*IDW*). Essa conclusão se baseou na análise visual dos padrões espaciais apresentados pelos mapas obtidos segundo os dois métodos;
- O mapa gerado pela aplicação do modelo apresentou padrões resultantes de combinações dos fatores selecionados, considerados determinantes à recarga. Em outras configurações da legenda de cores e dos valores das classes de recarga, observou-se as formas espaciais advindas dos fatores “uso e cobertura do solo” e “tipo de solo”;
- Devido à pequena extensão temporal do período analisado e pelo fato de terem sido considerados apenas fatores ambientais, a grosso modo, constantes no decorrer do tempo, o modelo de regressão não pode ser utilizado em previsões de recarga, seja para outras localidades semelhantes à qual o modelo foi desenvolvido, ou para épocas diferentes na mesma área estudada. No entanto, aumentando-se o tamanho do período temporal analisado e inserindo-se no grupo de fatores determinantes componentes temporalmente variáveis, como a precipitação, um modelo pode ser criado para a referida finalidade;
- Não foi realizada uma análise para se verificar a existência de correlação entre as variáveis independentes, procedimento que será futuramente executado, pelo fato de que pode resultar na exclusão de uma ou mais variáveis do modelo, melhorando a sua aplicabilidade, por se tornar menos exigente em termos de dados requeridos.

Agradecimentos

a) Ao servidor técnico do PTARH, Irioman Francisco Ramos de Sousa Júnior, pelo fundamental apoio na execução dos trabalhos de campo para obtenção das estimativas pontuais de recarga;

b) Ao CNPq e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal – FAP/DF, pelo apoio financeiro concedido;

Referências Bibliográficas

Xu, Y.; Beekman, H. E. **Groundwater recharge estimation in Southern Africa**. UNESCO IHP Series No. 64, UNESCO, Paris, 2003 207p.

Klock, H.; Udluft, P. Mapping groundwater recharge and discharge zones in the Kalahari: A remote sensing approach. **AridLands Newsletter**, 51, 2002. 9p.

Braun, G. M.; Levine, N. S.; Roberts, S. J.; Samel, A. N. A geographic information systems for the identification of groundwater recharge areas in Waukesha County, Wisconsin. **Environmental & Engineering Geoscience**. v. 9, n. 3, p. 267-278, 2003.

Oliveira, M. M.; Ferreira, J. P. C. L. Proposta de uma metodologia para a definição de áreas de infiltração máxima. In: Congresso da Água, 6., 2001, Lisboa. **Anais...** 16p.

Brasil. Zoneamento **Ecológico-Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno**. Brasília, 2003. 324p.

Reatto, A., Martins, E.S., Cardoso, E.A., Spera, S.T., Carvalho Jr., O.A.C., Silva, A.V. e Farias, M.F.R. **Levantamento de Reconhecimento de Solos de Alta Intensidade do Alto Curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100.000**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento N° 92. Embrapa Cerrados, Distrito Federal, Brasil, 2003. 55p.

Healy, R. W., Cook, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeolgy Journal**, v. 10, n. 1, p. 91-109, 2002.