



## DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RECARGA NOS AQUÍFEROS NA BACIA DE MAIPO (CHILE) ATRAVÉS DO MODELO WETSPASS-M

Nuno BARREIRAS<sup>1</sup>, João NASCIMENTO<sup>2</sup>, Patricio PLISCOFF<sup>3</sup>, Claudia GALLEGUILLOS<sup>4</sup>, Luis RIBEIRO<sup>2†</sup>

1. CERIS - Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, nuno.barreiras@tecnico.ulisboa.pt
  2. CERIS - Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, jnascimento@tecnico.ulisboa.pt
  3. Universidad Católica de Chile, Av Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Región Metropolitana, Chile
  4. Fundación Chile - Avenida Parque Antonio Rabat Sur 6165, Vitacura, Santiago de Chile
- †. Falecido

### RESUMO

O presente trabalho consistiu na elaboração do cálculo da distribuição espacial da recarga nos aquíferos, na delimitação das áreas principais de recarga e na avaliação do risco de contaminação na bacia hidrográfica do rio Maipo (Chile), para dois anos diferentes (1995 e 2016). Pretendeu-se assim, averiguar a evolução das áreas de máxima infiltração e impactos do uso do solo nos processos de recarga, com vista à otimização das estratégias de gestão dos aquíferos. Na fase exploratória dos dados, aplicaram-se vários métodos estatísticos, como por exemplo a avaliação de tendências temporais. Para o estudo da recarga e do risco de contaminação, aplicou-se o modelo WetSpass-M e o Índice de Susceptibilidade (IS), dos quais se produziram mapas de valores para toda a bacia. Como resultado, foi possível conhecer de que forma é que as alterações antrópicas estão a influenciar a vulnerabilidade dos aquíferos da bacia. Em termos de disponibilidade da água, verificou-se que de 1995 para 2016 as variações mais significativas estão relacionadas com a conversão de solos agrícolas em urbanos, ou seja, à impermeabilização de solos anteriormente com taxas de infiltração relevantes. São apresentadas ainda algumas conclusões como parte da definição de medidas de proteção e gestão das águas subterrâneas, e para o melhor controlo da evolução da piezometria e risco de contaminação.

**Palavras-Chave:** Recarga, vulnerabilidade, WetSpass, gestão de aquíferos, gestão de recursos hídricos

### 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho enquadra-se na iniciativa “Escenários Hídricos 2030, Fase II”, promovida e desenvolvida pela Fundación Chile, Fundación Futuro Latinoamericano y Fundación Avina. Teve a colaboração de várias equipas Chilenas, nomeadamente a equipa de Escenários Hídricos 2030, das Aguas da Funcación Chile, e do Centro de Ecología Aplicada, que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização dos objetivos do projeto. Este estudo pretende alcançar a segurança e sustentabilidade dos recursos hídricos no Chile para o ano 2050 através de um Plano Nacional de Segurança Hídrica. A área de estudo engloba a totalidade da Bacia Hidrográfica do Rio Maipo, com uma área aproximada de 15 300 km<sup>2</sup>, e integra a região metropolitana de Santiago do Chile e de Valparaíso. O trabalho da equipa do CERIS-IST consistiu na elaboração do cálculo da distribuição espacial da recarga, e na delimitação das principais áreas de recarga e na avaliação do risco de contaminação para toda a bacia, e para dois anos diferentes (1995 e 2016). Pretendeu-se assim, averiguar a evolução das áreas de máxima infiltração e impactos do uso do solo nos processos de recarga, com vista à otimização das estratégias de gestão dos aquíferos.

Para o estudo da recarga e do risco de contaminação consideraram-se várias abordagens metodológicas. Na fase exploratória dos dados, aplicaram-se vários métodos estatísticos, como por exemplo a avaliação de tendências temporais. Para o estudo da recarga e do risco de contaminação, aplicou-se o modelo *Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere* (WetSpass-M) e o Índice de Susceptibilidade (IS). Ambos os modelos apresentam resultados espaciais.

## 2. METODOLOGIA

Há vários modelos desenvolvidos e usados para a simulação espacial da recarga. Um desses modelos desenvolvidos mais recentemente é o WetSpass, que foi desenvolvido de modo a estimar a distribuição das componentes do balanço hídrico a longo prazo. Este modelo foi integrado num ambiente SIG e o seu desenvolvimento teve como base o modelo de distribuição espacial de balanços hídricos WetSpa (Batelaan et al. 1996; Wang et al. 1996; Batelaan e De Smedt 2001). Como dados de entrada o WetSpass tem várias variáveis físicas e climatológicas, tais como a precipitação, temperatura, evapotranspiração potencial, velocidade do vento, declives, profundidade do nível freático, tipo de solos e uso do solo. Em termos de dados de saída, o modelo WetSpass fornece mapas *raster* com a distribuição da recarga numa área de estudo, independentemente da escala espacial. Estes mapas constituem informação altamente relevante para modelos regionais de escoamento de águas subterrâneas, que normalmente assumem um valor relativamente uniforme para toda a área modelada (Batelaan e De Smedt 2007). A aplicação deste modelo tem vindo a mostrar bons resultados em vários ambientes e regiões climatológicas, devido a uma boa versatilidade na configuração dos seus parâmetros de calibração.

Mais recentemente, o WetSpass foi atualizado para um modelo de balanço hídrico mensal, denominado WetSpass-M (Abdollahi et al., 2017). Enquanto o modelo original WetSpass simula todos os processos hidrológicos numa escala de tempo sazonal (por exemplo, 1 ano), o WetSpass-M calcula a distribuição espacial e mensal da recarga, caso haja dados disponíveis para a sua aplicação.

A aplicação deste método geralmente consiste em três etapas: 1) compilação e processamento de dados, 2) simulação da recarga e outros componentes do balanço hídrico usando WetSpass-M e, 3) calibração e análise dos resultados. Todos os dados devem ser processados e transformados em mapas de informação, que irão alimentar o modelo com os valores de parâmetros necessários para fazer os cálculos. A segunda tarefa pode incluir a execução do modelo e a avaliação dos resultados, cujos períodos de cálculo dependerão principalmente da extensão, resolução do modelo e capacidades de processamento informático. Para este trabalho foi utilizado um servidor dedicado a fim de minimizar os tempos de execução e processos de calibração. A terceira etapa consiste nos procedimentos de calibração, atendendo a parâmetros específicos descritos em Abdollahi et al. (2017), e na análise dos resultados e sua interpretação.

No presente caso de estudo, onde se pretendia não só calcular a recarga, mas também o impacto do uso do solo nas áreas de recarga máxima, foram calibrados dois modelos WetSpass-M, um para o ano de 1995 e outro para o 2016. Assim, foi possível quantificar as alterações na distribuição espacial da recarga de acordo com os padrões de uso do solo, entre os dois anos analisados.

Uma segunda fase deste trabalho foi a avaliação do risco de contaminação por nutrientes nas principais áreas de recarga, para os dois anos analisados. Para isso, recorreu-se ao índice de suscetibilidade (IS) que é uma adaptação do índice de vulnerabilidade DRASTIC (Aller et al., 1987) e que foi criado por Ribeiro (2005). Este índice tem sido aplicado com sucesso em vários ambientes e por vários autores a nível mundial (por ex. Stigter et al., 2005; Ribeiro et al., 2017, Zhang et al., 2018). A principal alteração é a adição do parâmetro LU (Uso do Solo), que corresponde à ocupação do solo, abandonando assim o conceito de um índice puramente intrínseco (baseado unicamente nas condições naturais). Noutras palavras, o IS foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade específica, definida pelos impactos potenciais do uso específico dos solos e dos contaminantes associados a esse uso. O IS é calculado pela soma ponderada dos valores atribuídos a 4 parâmetros do DRASTIC (D, R, A e T) e ao novo parâmetro LU (Eq. 1).

$$IS = 0.186D + 0.212R + 0.259A + 0.121T + 0.222LU \quad (\text{Eq. 1})$$

Finalmente, procedeu-se ao cruzamento dos mapas das áreas de infiltração máxima com o mapa do IS, de modo a classificar espacialmente para essas áreas, o risco associado à contaminação por nutrientes. Assim, foi possível providenciar uma ferramenta de relevo para a definição de medidas de proteção e gestão das águas subterrâneas, nomeadamente das principais áreas de recarga em aquíferos de maior importância.

## 3. RESULTADOS

Para a aplicação da metodologia proposta foi necessário um esforço de compilação e tratamento de variáveis geográficas, pedológicas, geológicas, geomorfológicas, climáticas, uso do solo e de recursos hídricos de forma a construir a base de dados de entrada para os modelos referidos.

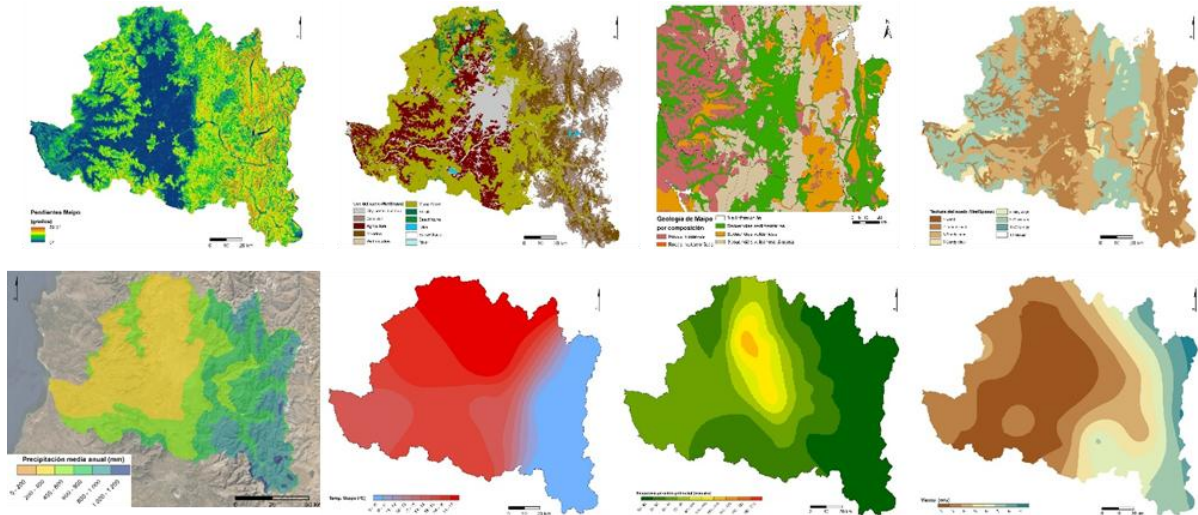


Figura 1: Variáveis de entrada dos modelos

Após o processo de implementação e calibração do modelo WetSpss, confirmou-se que o escoamento superficial se observa maioritariamente na zona este da região metropolitana de Santiago e, posteriormente, nas linhas de água que se originam em direção ao mar. A zona norte é a que apresenta menores valores de escoamento. Verificou-se ainda que os valores de recarga oscilam entre 0 e 225 mm/ano, com um valor médio para toda a bacia de aproximadamente 47.9 mm/ano para 1995 e 45.0 mm/ano para 2016 (Figura 2, Esq.). Esta diferença deve-se à dinâmica do uso do solo, nomeadamente a conversão de alguns terrenos agrícolas em áreas urbanizadas, o que provocou não só uma diminuição da recarga nessas áreas como resultou numa maior descontinuidade espacial. Assim, a dinâmica dos aquíferos locais é afetada, já que as zonas agrícolas coincidem com as áreas mais importantes para a recarga dos aquíferos regionais.

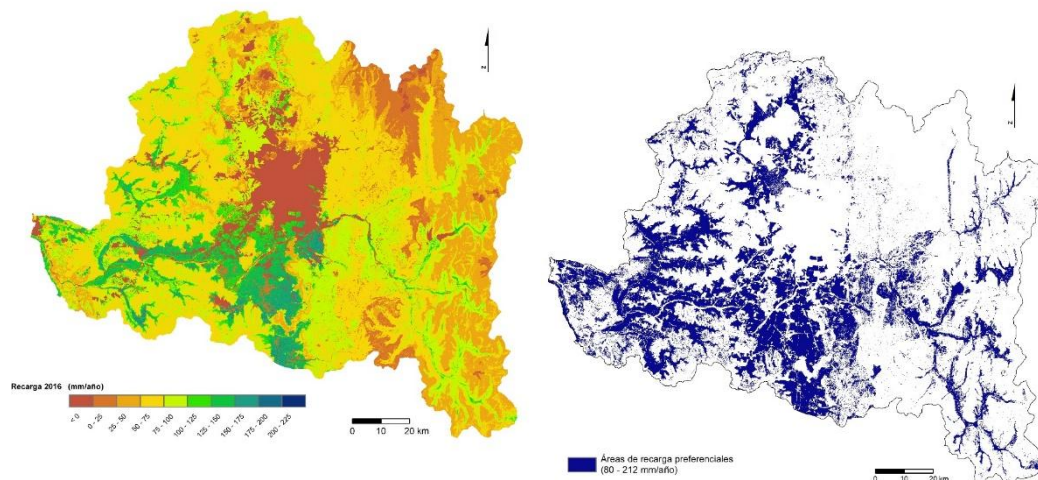


Figura 2: Esq: Valores de recarga para toda a bacia de Maipo, para o ano de 2016. Dir: Zonas preferenciais de recarga



As principais áreas de recarga na área de estudo estão representadas na Figura 2, à direita. Como se demonstra na Figura 2, estas áreas estratégicas encontram-se nas planícies a sul da região metropolitana, tal como ao longo dos territórios contíguos às principais linhas de água da red hidrográfica do rio Maipo. Esta área representa 25% da área da bacia e é responsável por 46% do total da recarga.

A avaliação do risco de contaminação da água subterrânea, considerando o método do índice de suscetibilidade, identificou as áreas onde o risco de contaminação é maior tendo em conta a relação entre as características naturais da bacia e a pressão antrópicas (uso do solo). O resultado da aplicação desta metodologia ao ano de 2016 (Figura 3), indica que a distribuição do risco de contaminação é muito variável, condicionada essencialmente pela existência de práticas agrícolas e pelo tecido urbano existente na bacia. No que se refere às classes de risco mais elevado, estão claramente associadas às áreas agrícolas, em terrenos pouco declivosos e com uma componente arenosa significativa (sul e sudoeste de Santiago). A zona metropolitana de Santiago apresenta um risco de contaminação “Moderado a baixo”, devido aos baixos valores de recarga calculados pelo WetSpa e à maior profundidade do nível piezométrico (20 a 30 m de profundidade).

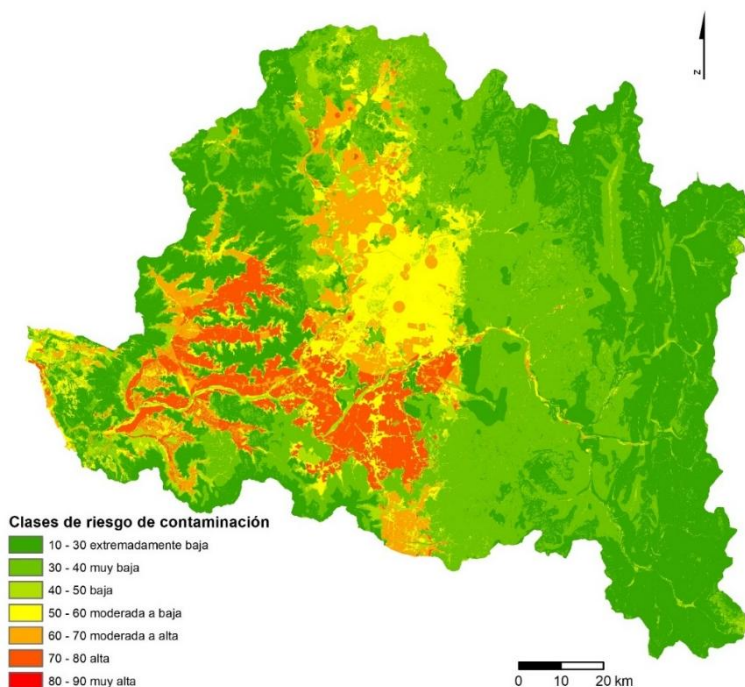


Figura 3. Impacto do uso do solo no risco de contaminação da água subterrânea

#### 4. CONCLUSÕES

Através da aplicação do WetSpa e das cartas de uso do solo para 1995 e 2016 (Pliscoff, 2020) foi possível conhecer de que forma é que as alterações antrópicas estão a influenciar a vulnerabilidade dos aquíferos da bacia. No caso da disponibilidade da água, verificou-se que de 1995 para 2016 as variações mais significativas estão relacionadas com a redução da recarga a sul, associada à conversão de solos agrícolas em urbanos, ou seja, à impermeabilização de solos anteriormente com taxas de infiltração relevantes. A redução associada a esta alteração atinge os -150 mm de recarga anual. O aumento da recarga em algumas áreas, associada à alteração da cobertura vegetal, como por exemplo as variações entre bosques, zonas de mata e zonas de floresta, não compensa a variação negativa referida. No geral, verificou-se que ocorreu uma diminuição da recarga entre os dois períodos, salientando-se como a classe de variação predominante a correspondente à diminuição entre 100 a 150 mm. Esta redução ocorre numa área de 243 km<sup>2</sup>.

No que se refere à variação do risco de contaminação entre 1995 e 2016, não se detectaram diferenças significativas. No entanto, ocorre um agravamento acentuado do risco em áreas pontuais um pouco por toda a

bacia. Por outro lado, devido à impermeabilização de terrenos agrícolas a sul de Santiago observou-se que algumas dessas zonas evoluíram positivamente, ou seja, o risco de contaminação diminuiu, associado à redução da recarga.

Como parte da definição de medidas de proteção e gestão das águas subterrâneas, e para o melhor controlo da evolução da piezometria e risco de contaminação, a gestão das águas subterrâneas na bacia do Maipo deverá ter em conta as seguintes conclusões:

- A localização das principais zonas de recarga está associada às maiores extrações;
- Verifica-se uma diminuição das áreas de recarga devido à conversão de áreas agrícolas em urbanas;
- As principais zonas de recarga apresentam um risco de contaminação alto;
- As séries piezométricas evidenciam uma descida dos níveis na maior parte dos pontos de monitorização. Em alguns desses pontos a descida do nível é bastante pronunciada. Salienta-se que o rebaixamento continuado dos níveis piezométricos indica que o aquífero se encontra em regime de sobreexploração e consequente diminuição da disponibilidade no futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Griensven, A.V., Huysmans, M., Batelaan, O., (2017) A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environ Earth Sci* (2017) 76:198. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6512-1>
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. & Petty, R. J. (1987) DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA Report 600/2-85/018, 1987.
- Batelaan O, Wang ZM, De Smedt F (1996) An adaptive GIS toolbox for hydrological modeling. In: Kovar K, Nachtnebel HP (eds) *Application of geographic information systems in hydrology and water resources management*. IAHS Publication 235:3–9
- Batelaan O, De Smedt F (2001) WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modeling, vol 269. IAHS Publication, pp 11–18
- Batelaan, O., De Smedt, F., 2007. GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances. *J Hydrol* 337(3):337–355
- Pliscoff, P. (2020) Análisis del estado actual de los ecosistemas terrestres, asociados a dos cuencas en Chile central: Maipo y Maule. Estudio realizado para Escenarios Hídricos 2030. Universidad Católica de Chile.
- Ribeiro L. (2005) Desenvolvimento e aplicação de um novo índice de susceptibilidade dos aquíferos à contaminação de origem agrícola - in *Actas do 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, ed. CDROM, APRH, Évora, Portugal.
- Ribeiro, L., Pindo, J.C., Dominguez-Granda, L. (2017) Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of The Total Environment*, Volume 574, 1 January 2017, Pages 1674-1683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.004>
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L., Dill, A.M.M.C. (2006) Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeol J* 14, 79–99. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>
- Wang ZM, Batelaan O, De Smedt F (1996) A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Phys Chem Earth* 21(3):189–193
- Zhang, Y., Weissmann, G. S., Fogg, G. E., Lu, B., Sun, H., & Zheng, C. (2018) Assessment of Groundwater Susceptibility to Non-Point Source Contaminants Using Three-Dimensional Transient Indexes. *International journal of environmental research and public health*, 15(6), 1177. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061177>