

Ribagua

Revista Iberoamericana del Agua

ISSN: 2386-3781 (Print) 2529-8968 (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/trib20>

Ensaaios em coluna-de-solo para avaliar o destino de poluentes de ETAR simulando condições de recarga controlada de aquíferos (SAT-MAR)

Tiago Nunes Martins, Teresa E. Leitão & Maria José Henriques

To cite this article: Tiago Nunes Martins, Teresa E. Leitão & Maria José Henriques (2019) Ensaaios em coluna-de-solo para avaliar o destino de poluentes de ETAR simulando condições de recarga controlada de aquíferos (SAT-MAR), Ribagua, 6:1, 78-86, DOI: [10.1080/23863781.2019.1635919](https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1635919)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1635919>



© 2019 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group on behalf of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).



Published online: 19 Jul 2019.



[Submit your article to this journal](#)



Article views: 41



[View related articles](#)



[View Crossmark data](#)

Ensaio em coluna-de-solo para avaliar o destino de poluentes de ETAR simulando condições de recarga controlada de aquíferos (SAT-MAR)

Tiago Nunes Martins, Teresa E. Leitão and Maria José Henriques

Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

RESUMO

As metodologias de tratamento solo-aquífero (Soil-Aquifer Treatment ou SAT) são aqui estudadas como meio complementar para a remoção de contaminantes de águas residuais tratadas, com o propósito de melhorar a qualidade da água infiltrada em bacias para recarga controlada de aquíferos (Managed Aquifer Recharge ou MAR). Foram realizados ensaios em coluna com o solo da área anexa à ETAR de São Bartolomeu de Messines (Algarve) e analisados, na água de injeção e na água de saída, um conjunto de nutrientes, metais e compostos farmacêuticos. Foi possível observar a redução de alguns destes compostos (amónia, diclofenac e carbamazepina) e verificar a persistência de outros (boro, zinco, cobre, nitratos, gemfibrozil e naproxeno) após a percolação da água pelo solo.

PALAVRAS CHAVE

Gestão da recarga de aquíferos (MAR); tratamento solo-aquífero (SAT); ensaios em coluna-de-solo; qualidade; contaminantes emergentes

1. Introdução

No contexto da gestão da recarga de aquíferos (*Managed Aquifer Recharge* ou MAR) têm vindo a ser exploradas diferentes técnicas complementares de tratamento de águas visando a melhoria da qualidade da água que é infiltrada. As técnicas, denominadas por Tratamento Solo-Aquífero, ou *Soil-Aquifer Treatment* (SAT), são definidas por Abel [1] como técnicas que permitem a depuração da água durante o próprio processo de infiltração na zona vadosa (não saturada), através de processos físicos, químicos e biológicos. A melhoria da qualidade da água é conseguida utilizando a capacidade do solo para reduzir as concentrações de contaminantes, capacidade que aumenta com a permanência e superfície de contacto da água com o solo. Compostos orgânicos, azoto, fósforo, sólidos suspensos, metais, bactérias e vírus podem ser removidos com sucesso através da retenção de partículas, da adsorção, da transformação e da biodegradação. Neste contexto, as técnicas SAT podem ser um processo fundamental na reutilização de águas residuais, permitindo aumentar a disponibilidade de água ao mesmo tempo que proporcionam o seu tratamento.

Quando se aborda a temática da reutilização de água (*reclaimed water*), em particular em países com leis ambientais mais restritivas onde estes processos são aplicados com elevadas taxas de sucesso, a questão da composição química e biológica destas águas e os seus

impactos sobre o ambiente ganham uma importância crescente [2]. A problemática dos contaminantes emergentes tem sido um tema cada vez mais presente, em grande parte devido aos avanços recentes na química analítica que tem vindo a reduzir os limites de deteção das concentrações de fármacos nas águas [3]. Embora, na generalidade dos casos, as concentrações de fármacos no ambiente sejam baixas (nanogramas a microgramas por litro), os efeitos potenciais na saúde pública associados à ingestão continuada destes produtos químicos na água consumida podem assumir relevância.

Os efeitos de misturas farmacêuticas complexas são ainda desconhecidos, mas também os resultantes da descarga destes compostos através de água residual, os quais podem promover uma crescente resistência bacteriológica a antibióticos e outros compostos, causando problemas reprodutivos em organismos aquáticos a eles expostos [4]. Christensen [5] e Webb et al. [6] concluem que as concentrações encontradas para alguns fármacos em meio aquático, e consequente transmissão para água para consumo humano e para peixes, não representam risco apreciável para a saúde humana sendo, no entanto, fundamental, segundo Cunningham et al. [7], acautelar os efeitos da exposição crónica à mistura destes compostos emergentes, definir a suscetibilidade dos indivíduos, particularmente em populações debilitadas ou imunossuprimidas, e aumentar a eficiência dos métodos de tratamento na remoção de resíduos farmacêuticos em ETAR.

Calisto e Esteves [8] observam, numa revisão da literatura, grandes discrepâncias na quantidade de fármacos removidos no processo de tratamento das ETAR, indicando que alguns métodos usados atualmente mostram eficiências de remoção abaixo de 10% e, consequentemente, grandes quantidades de substâncias ativas inalteradas descarregadas. Em alguns casos, isto justifica uma ocorrência elevada destes compostos nas matrizes ambientais, reforçando a necessidade de se encontrarem alternativas viáveis de remoção através de estratégias de reabilitação que diminuam o impacto deste problema. Embora a questão dos contaminantes emergentes não se afigure, para já, como um problema de grandes proporções, Jones et al. [9] afirmam que será prudente aplicar o princípio da precaução, com base nos resultados da monitorização, tentando-se reduzir os níveis destes compostos antes que a sua perigosidade seja provada.

A aplicação de camadas reativas em bacias de infiltração pode apresentar-se como uma solução pouco dispendiosa na melhoria da qualidade de água de recarga, com resultados positivos já demonstrados em projetos como o ENSAT [10]. Ainda projetos como DEMAU [11], MARSOL (www.marsol.eu/), onde este trabalho se insere, demonstraram que a aplicação de metodologias SAT pode apresentar-se como solução para a diminuição da concentração de contaminantes emergentes em processos de gestão de recarga de aquíferos.

2. Objetivos e área de estudo

Neste estudo analisa-se a eficiência da remoção de contaminantes na água de descarga de uma ETAR, em função do tratamento das águas através de técnicas SAT, demonstrando-se que o processo de recarga controlada de aquíferos se pode apresentar como um meio de tratamento complementar. A aplicação destas técnicas pressupõe o conhecimento da capacidade de depuração/descontaminação do solo a utilizar nas bacias como camada reativa. Nesse sentido foram realizados ensaios em coluna-de-solo no Laboratório de Águas Subterrâneas do LNEC (www.lnec.pt/pt/investigacao/infraestruturas-de-investigacao/instalacao-experimental-de-hidraulica-fluvial/, aquífero artificial), utilizando o solo do local de instalação das bacias de infiltração. Foi ainda realizado um ensaio *batch* para a determinação da capacidade máxima de absorção dos solos analisados.

É no contexto hidrogeológico do limite norte do sistema aquífero cársico de Querença-Silves, no Algarve, que se propõe a construção de bacias de infiltração para a promoção da recarga que ocorre naturalmente através do Ribeiro Meirinho [12] utilizando os efluentes tratados da ETAR de São

Bartolomeu de Messines. Estas bacias funcionarão como meio complementar de tratamento da própria ETAR que apresenta uma carga importante de nitratos na zona de descarga no Ribeiro Meirinho, mostrando também concentrações de diversos compostos farmacêuticos na ordem das décimas de micrograma por litro, entre eles a Carbamazepina (anticonvulsivo), Diclofenac (anti-inflamatório), Naproxeno (anti-inflamatório) ou o Atenolol (β -blocker) que tendem a ser persistentes após o tratamento a que é sujeita esta água. Esta ETAR recebe efluente urbano e serve a freguesia de São Bartolomeu de Messines – 4228 habitantes [13]. Esta freguesia conta com uma população relativamente envelhecida (51,6% na faixa etária 25–64 anos e 28% na faixa etária > 64 anos) onde o consumo de fármacos é prevalente e será a principal origem destes compostos no efluente tratado nesta infraestrutura. Na povoação existe uma unidade pública de saúde familiar que se exclui como origem destes compostos uma vez que neste tipo de instalações se procede ao armazenamento de efluentes para posterior tratamento, sendo a sua gestão feita no âmbito do Plano de Gestão de Resíduos Hospitalares, conforme o tipo de efluente definido no Despacho n.º 242/96 e segundo as regras estabelecidas no Decreto-Lei n.º 178/2006. Os efluentes destas instalações são resíduos que apresentam riscos significativos para a saúde e ambiente sendo por esse motivo mobilizados para unidades de tratamento especializadas [14].

3. Materiais e métodos

A qualidade da água de descarga da ETAR, após tratamento, foi analisada através da recolha e análise de amostras de água em diferentes períodos. Determinaram-se as concentrações de um conjunto de compostos farmacêuticos que vão desde anti-inflamatórios a contrastes de exames radiológicos. Foram também analisados três elementos traço comuns na matriz destas águas residuais – boro, cobre e zinco (atendendo às conclusões sobre a qualidade das águas da região apresentada em Leitão et al. [15]) – nutrientes como nitratos, nitritos, amónia, sulfatos e fosfatos, para além de parâmetros medidos *in-situ* (pH, condutividade elétrica, temperatura e potencial redox).

O solo utilizado nos ensaios foi recolhido na área anexa à ETAR. Foi feita a sua caracterização química inicial, considerando os mesmos parâmetros utilizados para a água do efluente, com exceção dos fármacos.

Os ensaios em coluna-de-solo (cf. Figura 1) utilizaram um aparato laboratorial que segue os protocolos

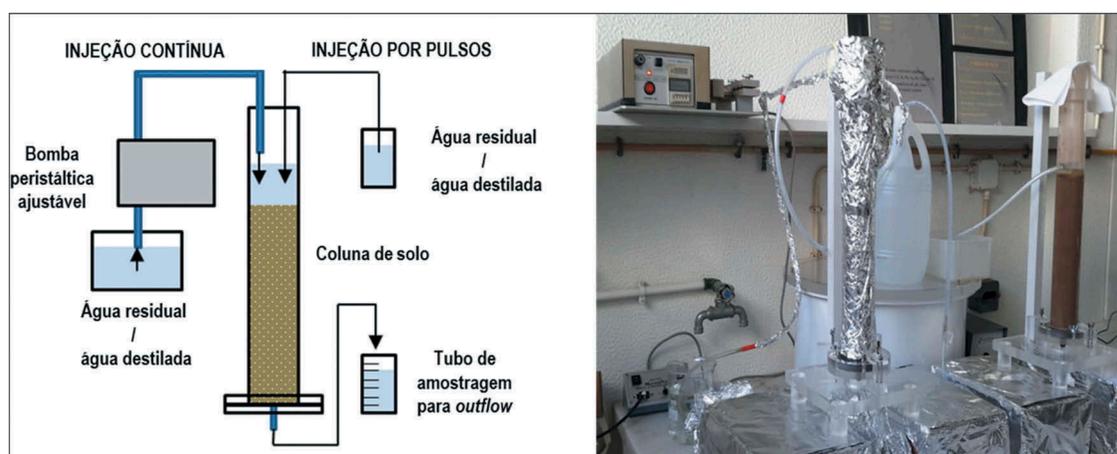


Figura 1. Esquema de funcionamento das colunas-de-solo e aparato laboratorial.

propostos em DEMEAU [16], sendo composto por uma coluna cilíndrica transparente de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), com 50 cm de altura e 5 cm de diâmetro, acoplada a uma plataforma de fixação com sistema de compactação [17]. Este sistema é composto por um peso de 125 g, conforme a norma *CEN/Technical Specification 14405* [18]. A base é composta por um sistema estanque com canal de saída de $\varnothing = 5$ mm e um filtro Teflon não reativo para retenção de partículas.

Foram realizados três ensaios em coluna-de-solo, descrevendo-se no Quadro 1 as diferentes condições testadas, nomeadamente as diferenças na espessura de solo nas colunas, os procedimentos de compactação e as condições de saturação. Antes do início dos ensaios cada coluna foi previamente saturada pela base com água destilada de forma a prevenir a formação de bolsas de ar. Durante o ensaio, a injeção de água foi feita pelo topo de forma contínua com recurso a uma bomba peristáltica ajustável e/ou por pulsos adicionando-se um volume conhecido separado em intervalos pré-definidos

simulando-se as condições de saturação/não saturação das bacias de infiltração. De referir que, em paralelo, se procurou também verificar qual o comportamento físico do solo em análise como resposta a processos de colmatação resultantes da elevada carga biológica da água de entrada. Nesse sentido, nas Colunas 2 e 3 os ensaios decorreram até que o solo na coluna se apresentasse totalmente colmatado (i.e. não se verificam caudais à saída da coluna).

O procedimento de amostragem decorreu ao longo dos ensaios, estando o diferente número de amostras de água recolhida à saída de cada coluna diretamente associado a dois fatores: (1) permeabilidade dos solos na coluna e (2) volumes mínimos necessários para análise química. No decorrer dos ensaios a permeabilidade das colunas tende a baixar por colmatação dos poros, pelo que o espaçamento temporal entre amostras é menor no início e aumenta à medida que o caudal à saída da coluna vai diminuindo. O pequeno número de amostras recolhidas para caracterização da presença de contaminantes emergentes está diretamente associado com o volume

Quadro 1. Síntese das condições experimentais para os ensaios em coluna-de-solo.

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3
Espessura de solo (cm)	20	30	30
Compactação do solo	3 pancadas	3 pancadas	2 pancadas
Condições de saturação	Sempre saturado	Fase 1: sempre saturado Fase 2: Ciclos de saturação/não saturação	Ciclos de saturação/não saturação
Injeção	Contínua	Fase 1: Contínua Fase 2: Pulso	Pulso
Camada inerte no topo	Não	Sim (0,5 cm)	Sim (0,5 cm)
Matriz da água de injeção (Saturação inicial – Destilada)	Água residual	(Saturação inicial – Destilada) Água residual	2 primeiros ciclos de saturação – Destilada Ciclos seguintes – Água residual
Tempo do ensaio (d)	4	33	16
1 Pore volume (mL)	173,2	261,1	256,3
Permeabilidade (m/d)	1,45	0,59	2,64

1. Os valores de permeabilidade apresentados correspondem aos obtidos no dia 1 de ensaio em cada coluna de solo

necessário para que a análise química fosse possível (1 L) e que era, atendendo às condições experimentais, difícil de obter. A redução de caudal conduziu a que fosse necessário intervalos de tempo maiores para se obter amostras de água de igual volume.

O número de amostras de água obtidas por ensaio, o tempo de recolha e o *pore-volume* (PV) apresentam-se no **Quadro 2**. PV é a unidade adimensional correspondente a um ciclo de circulação e renovação de toda a água na coluna-de-solo, que equivale a 173,2, 261,1 e 256,3 mL para as Colunas 1, 2 e 3, respetivamente. A referência A0 reporta-se, em todos os casos, à água de entrada.

Foi, ainda, realizado um ensaio *batch* ao solo original conforme os critérios estabelecidos por EPA [19] com a adição de água da ETAR ao solo num recipiente fechado numa proporção água:solo de 5:1.

4. Resultados

4.1. Características do solo natural

A análise granulométrica por peneiração, em conjunto com uma análise de finos após separação da fração inferior a 63 µm por meio aquoso, permitiu definir que no solo analisado a fração inferior a 2 mm é de 84% e que a fração inferior a 63 µm é de 18%. A análise do tipo de argilas permitiu identificar que os minerais

em maior proporção neste solo são o quartzo, a calcite, a montmorilonite e feldspatos (anortite) – composição típica de um solo resultante da alteração de calcários, rochas que compõem o aquífero Querença – Silves. Foram ainda detetadas em concentrações vestigiais dolomite, mica (ilite), caulinite e hematite. Por ataque com ácido clorídrico determinou-se a percentagem de carbonados – sendo que este solo apresenta uma percentagem de 24%. O teor em matéria orgânica é de 3%. A elevada percentagem e o tipo de argilas presente bem como a matéria orgânica presente apresentam condições favoráveis para a retenção de metais por processos de adsorção e absorção, podendo igualmente ajudar a reter fármacos aumentando o tempo disponível para a sua biodegradação.

4.2. Qualidade da água à saída da ETAR e ensaios *batch*

Foram analisados 32 parâmetros na água à saída da ETAR, 24 dos quais fármacos. O **Quadro 3** apresenta algumas concentrações dos efluentes em ‘concentração à entrada,’ consideradas para valor inicial da qualidade da água à entrada das colunas (*pré-batch*).

Por forma a analisar a capacidade máxima de adsorção de fármacos pelo solo utilizado, realizaram-se ensaios *batch*. Estes ensaios consistem na mistura de uma solução de composição conhecida com uma massa

Quadro 2. Tempos de amostragem e *pore volume* (PV) nos ensaios em coluna-de-solo.

Elementos do ciclo do azoto e metais				Contaminantes emergentes				
Coluna	Amostra	Tempo (d)	N.º de PV	Coluna	Amostra	Tempo (d)	N.º de PV	
1	A0	-	-	1	A1	0,9	5,7	
	A1	0,1	0,5		2	A0	-	-
	A2	0,1	0,9			A1	7,9	6,5
	A3	0,2	1,5	3	A0	-	-	
	A4	0,3	2,0		A1	7,2	9,5	
	A5	0,9	5,7		A2	15,2	14,1	
	A6	1,2	6,8					
	A7	1,4	7,5					
	A8	1,9	9,3					
	A9	2,3	10,3					
	A10	3,3	12,2					
A11	4,3	13,7						
2	A0	-	-					
	A1	0,2	0,3					
	A2	0,3	0,5					
	A3	0,9	2,0					
	A4	1,0	2,1					
	A5	1,1	2,2					
	A6	1,3	2,3					
3	A7	2,1	3,0					
	A0	-	-					
	A1	7,2	9,5					
	A2	15,2	14,1					

Quadro 3. Análise comparativa entre as concentrações iniciais e após interação em *batch* com o solo.

Parâmetro	Concentração <i>pré-batch</i>	Concentração <i>pós-batch</i>	Parâmetro	Concentração <i>pré-batch</i>	Concentração <i>pós-batch</i>
Boro (mg/L)	0,235	0,736	Bezafibrato (µg/L)	0,1	0,07
Cobre (mg/L)	0,002*	0,0135	Clofibrato (µg/L)	0,02*	0,02*
Zinco (mg/L)	0,0027	0,0054	Diclofenac (µg/L)	0,48	0,29
Amónia (mg/L)	34,2	13,6	Fenoprofeno (µg/L)	0,02*	0,02*
Nitratos (mg/L)	2*	2*	Gemfibrozil (µg/L)	0,29	0,24
Nitritos (mg/L)	0,005*	0,175	Ibuprofeno (µg/L)	0,06	0,01*
Fosfatos (mg/L)	7,68	1,4	Indometacina (µg/L)	0,03	0,02
Sulfatos (mg/L)	64,7	67	Ketoprofeno (µg/L)	0,01*	0,01*
Atenolol (µg/L)	0,27	0,01*	Naproxeno (µg/L)	0,56	0,54
Betaxolol (µg/L)	0,01	0,01*	Carbamazepina (µg/L)	0,48	0,3
Bisoprolol (µg/L)	0,09	0,01*	Diazepam (µg/L)	0,01*	0,01*
Metoprolol (µg/L)	0,07	0,01*	Etofibrato (µg/L)	0,02*	0,02*
Pindolol (µg/L)	0,01*	0,01*	Fenofibrato (µg/L)	0,04*	0,04*
Propranolol (µg/L)	0,05	0,02	Pentoxifilina (µg/L)	0,24	0,01*
Sotalol (µg/L)	0,08	0,01*	Fenacetina (µg/L)	0,01*	0,01*
Ácido acetilsalicílico (µg/L)	0,02*	0,02*	Fenazona (µg/L)	0,01*	0,01*

*Valores abaixo dos limites de deteção.

adsorvente em ambiente fechado por um determinado período de tempo no fim do qual a solução é separada da componente sólida, procedendo-se à sua caracterização química [19]. Este procedimento permite estimar as diferenças de concentração dos compostos presentes na solução antes e após a interação com a massa adsorvente, caracterizando-se, em condições experimentais, a capacidade de remoção de componentes da solução.

Os ensaios *batch* sobre o solo natural decorreram durante um período de 48 horas. Findo esse período, a água foi analisada e observou-se a retenção/transformação de oito fármacos – valores abaixo do limite de deteção após interação com o solo – e a ocorrência de sete fármacos recalcitrantes mas com concentrações inferiores às da água de entrada após interação com o solo (propranolol, bezafibrato, diclofenac, gemfibrozil, indometacina, naproxeno e carbamazepina) – **Quadro 3**.

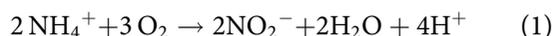
O boro, cobre e zinco tendem a aumentar os seus valores possivelmente pela solubilização destes elementos presentes no próprio solo. As concentrações de amónia à saída são menores que à entrada verificando-se um aumento da concentração em nitritos resultante da nitrificação da amónia. Verifica-se ainda uma redução considerável dos fosfatos na comparação entre *pré-batch* e *pós-batch*.

4.3. Resultados dos ensaios de coluna-de-solo

4.3.1. Ciclo do azoto

Considerando o importante conteúdo em azoto que a matriz deste tipo de águas de ETAR contém [2], confirmado pelos resultados apresentados no **Quadro 3**,

foram analisados à entrada e à saída das colunas as concentrações de nitratos, nitritos e amónia. Por observação da **Figura 2** verifica-se que a amónia (NH_4^+) está a ser nitrificada apresentando concentrações à saída muito inferiores às da água de entrada (A0) – devido às reações químicas:



Assim, e como resultado da nitrificação da amónia, verifica-se um aumento da concentração de nitratos. Este processo é mais acentuado na Coluna 2 na medida em que os ciclos de saturação/não saturação favorecem a entrada de oxigénio na coluna. Por oposição, na Coluna 1 onde a injeção é contínua, verifica-se na secção final do ensaio, uma subida de concentração de NH_4^+ , como resultado de não haver períodos de oxigenação do solo na coluna e, por conseguinte, não ser possível haver degradação de toda a amónia da água de entrada (A0).

4.3.2. Metais

Relativamente aos metais foram analisados os elementos boro, cobre e zinco. O boro apresenta, na maioria das situações, concentrações constantes ao longo do tempo em todos os ensaios, embora se observe em particular na Coluna 2 e 3 um aumento das concentrações nas amostras à saída comparativamente à entrada (**Figura 3**). Na Coluna 1 observa-se um aumento, na primeira amostra, seguido de uma estabilização em valores idênticos aos de entrada.

O cobre e zinco apresentam concentrações que começam por aumentar no início dos ensaios,

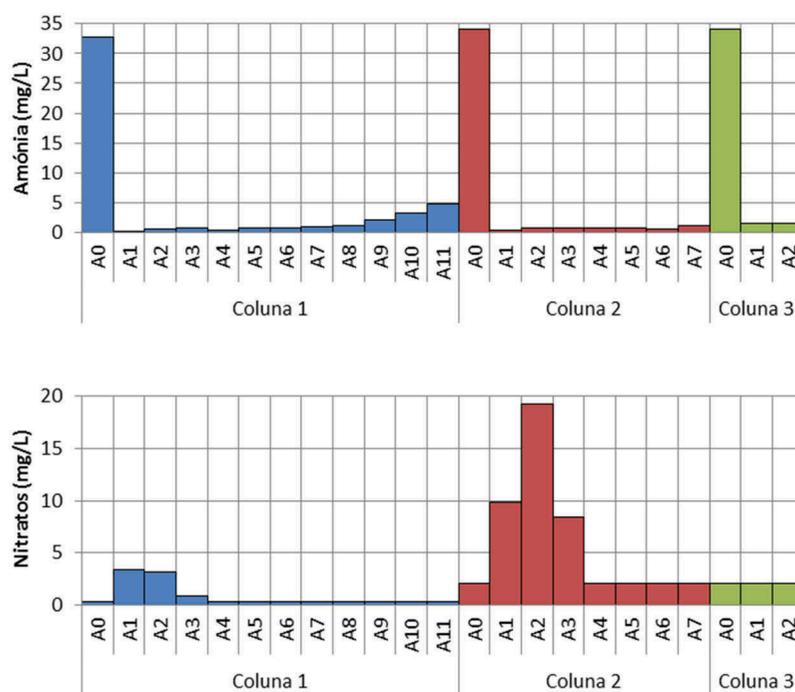


Figura 2. Evolução da concentração de amônia (gráfico superior) e nitratos (gráfico inferior) nas amostras recolhidas ao longo dos ensaios.

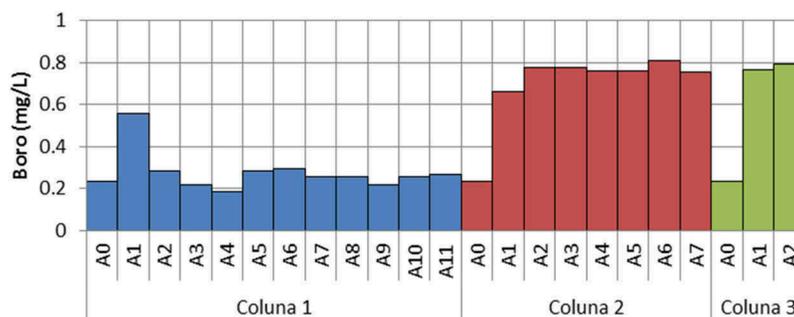


Figura 3. Evolução da concentração de boro nas amostras recolhidas ao longo dos ensaios.

relativamente aos valores de entrada (A0), e que depois apresentam tendência a decrescer e estabilizar ao longo do tempo (Figura 4). Este facto resultará de uma lavagem inicial do solo nos primeiros ciclos dos ensaios, ele próprio contendo metais na sua composição e origem, mostrando uma fraca capacidade de retenção destes metais pelo solo. Atendendo às concentrações aproximadamente constantes ao longo do ensaio observadas para o zinco na Coluna 1, por comparação com o valor substancialmente inferior da concentração à entrada, e atendendo à fraca capacidade de retenção dos elementos analisados por este solo nos restantes ensaios, supõe-se que a concentração à entrada resulte de um problema no procedimento de análise laboratorial da amostra de entrada, uma vez que os valores observados

à saída da Coluna 2 e 3 são próximos de/compatíveis com aqueles que são medidos à saída da Coluna 1. Nesse contexto seria de esperar que a concentração à entrada seria semelhante para todas as colunas, o que não se observa.

4.3.3. Contaminantes emergentes

Foram analisados 24 fármacos escolhidos como os contaminantes emergentes de maior relevância, considerando dados obtidos anteriormente na matriz da água residual tratada da ETAR de São Bartolomeu de Messines (Quadro 3). Desse conjunto de 24 fármacos destacam-se a carbamazepina, diclofenac, naproxeno e gemfibrozil (Figura 5), que apresentam um comportamento recalcitrante após passagem pelos 30 cm

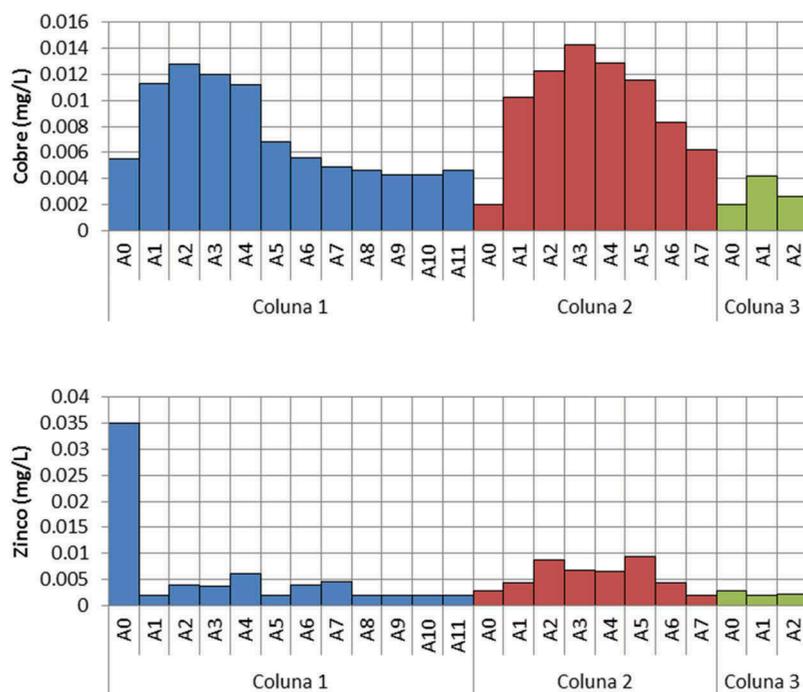


Figura 4. Evolução da concentração de cobre (gráfico superior) e zinco (gráfico inferior) nas amostras recolhidas ao longo dos ensaios.

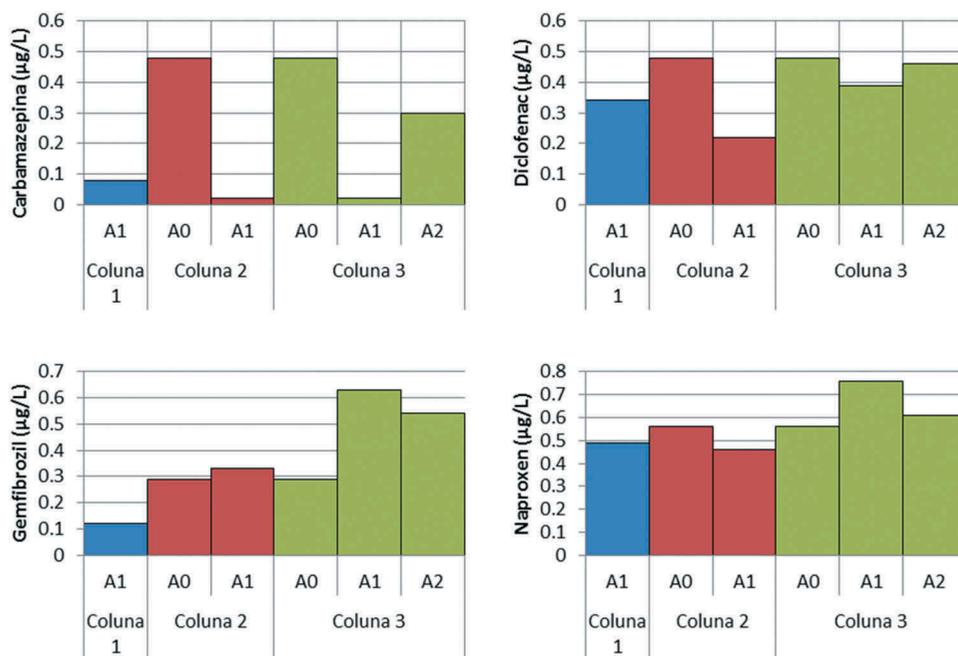


Figura 5. Evolução da concentração de carbamazepina (topo-esquerdo), diclofenac (topo-direito), gemfibrozil (base-esquerda) e naproxeno (base-direita) nas amostras recolhidas ao longo dos ensaios.

de coluna-de-solo, embora em concentrações inferiores à água de entrada. As exceções são o naproxeno e o gemfibrozil detetados na Coluna 3, onde os valores à saída são superiores aos da entrada (A0). Este facto pode dever-se a (a) heterogeneidades na

distribuição da concentração destes compostos resultantes do fracionamento do volume da amostra inicial em recipientes de menor volume no laboratório ou (b) à modificação das condições nas colunas ao longo dos ensaios que poderá ter resultado na

remobilização de contaminantes após um longo período em que estes foram retidos. Esta última hipótese embora plausível não pôde ser verificada atendendo ao número reduzido de amostras analisadas, pelos motivos declarados anteriormente, que não permite uma observação mais detalhada do comportamento destes compostos ao longo dos três ensaios (Quadro 2). As condições de temperatura por exemplo podem influenciar a retenção/mobilização destes compostos.

5. Conclusões

Os resultados obtidos nos ensaios realizados permitiram definir, para um conjunto de parâmetros analisados, nos quais se incluem fármacos comumente encontrados em águas de matriz residual urbana, quais os compostos que tendem a ser persistentes após a sua infiltração por uma camada de solo. Apesar deste método de tratamento se apresentar como uma solução viável e menos dispendiosa que os métodos tradicionais para a retenção de alguns dos contaminantes detetados na água de injeção, verifica-se que, para as condições experimentais e solos utilizados, existe capacidade de remoção de alguns compostos (amónia, diclofenac e carbamazepina) e verifica-se a persistência de outros (boro, zinco, cobre, nitratos, gemfibrozil e naproxeno).

A melhoria destes resultados poderá ser obtida com a otimização das condições físico-químicas do solo em termos de permeabilidade, teor de matéria orgânica e condições aeróbias/anaeróbias ideais para a retenção, adsorção e biodegradação dos contaminantes recalcitrantes. Para esse efeito a utilização de um solo de mistura composto pelo solo natural utilizado, por composto vegetal e por areia artificial (subproduto de indústria de extração para inertes) poderá melhorar capacidade de infiltração do solo e torná-lo uma camada filtrante reativa.

Agradecimentos

Os trabalhos desenvolvidos foram financiados pelo 7.º PQ da UE (FP7/2007-2013), contrato n.º 619120 (Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought, MARSOL), apoiados pela Águas do Algarve. Agradece-se ao IWW (<http://iww-online.de/en/>) a realização das análises dos fármacos.

Declaração de informação

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Notes on contributors

Tiago Nunes Martins is a Geologist and M.Sc. in Hydrogeology in University of Lisbon. Former research fellow in the MARSOL project (until march 2018). Currently conducting his Ph.D. at National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) on the subject of Managed Aquifer Recharge.

Teresa E. Leitão is Ph.D. in Hydrogeology, Senior Research Officer with Habilitation Degree at National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) in the field of groundwater quality, with research experience in groundwater monitoring, protection, modelling and reclamation. She was President of the Directive Board of the Portuguese Water Resources Association (APRH) and Vice-President of LNEC's Scientific Council. Since 1989 she has participated in 36 national and European research projects and 40 consultancy projects. She has published more than 300 different articles and she has received an APRH prize with the Ph.D. thesis "Methodologies for the rehabilitation of polluted aquifers."

Maria José Henriques is a principal technician in the Water Resources and Hydraulic Structures Division at the National Laboratory for Civil Engineering. She has a degree in Applied and Environmental Geology from the Faculty of Sciences of Lisbon University. Her main research activity is conducted in qualitative and quantitative field monitoring of groundwater resources and laboratory experiments for the study of hydrodynamic parameters and pollutant transport flow through the porous media.

Referências

- [1] Abel CDT. Soil aquifer treatment - assessment and applicability of primary effluent reuse in developing countries. Submitted in fulfilment of the requirements of the Board for Doctorates of Delft University of Technology and of the Academic Board of the UNESCO-IHE Institute for Water Education for the Degree of Doctor. CRC Press/Balkema; 2014. 187 pp.
- [2] Henze M, Comeau Y. Biological wastewater treatment: principles, modelling and design. IWA Publishing; 2008. 511 pp.
- [3] Schwab BW, Hayes EP, Fiori JM, et al. Human pharmaceuticals in US surface waters: a human health risk assessment. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2005;42:296–312.
- [4] Hu, L., Martin, H.M., Strathmann, T.J., 2010. Oxidation Kinetics of Antibiotics during Water Treatment with Potassium Permanganate. *Environ. Sci. Technol.* 44, 6416–6422. <https://doi.org/10.1021/es101331j>
- [5] Christensen FM. Pharmaceuticals in the environment —a human risk? *Regul Toxicol Pharmacol.* 1998;28:212–221.
- [6] Webb S, Ternes T, Gibert M, et al. Indirect human exposure to pharmaceuticals via drinking water - short communication. *Toxicol Lett.* 2003;142:157–167.

- [7] Cunningham VL, Binks SP, Olson MJ. Human health risk assessment from the presence of human pharmaceuticals in the aquatic environment. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2009;53:39–45.
- [8] Calisto V, Esteves VI. Psychiatric pharmaceuticals in the environment. *Chemosphere.* 2009;77:1257–1274.
- [9] Jones OA, Lester JN, Voulvoulis N. Pharmaceuticals: a threat to drinking water? *Trends Biotechnol.* 2005;23(4):163–167.
- [10] ENSAT. Technical final report. LIFE08 ENV/E/000117. 2012. 52 pp.
- [11] DEMEAU. Decision trees for MAR impact evaluation, Identification of optimum conditions to face emerging pollutants removal in MAR systems. 2013. Deliverable 12.1. 101 pp.
- [12] Lobo Ferreira JP, Leitão TE, Oliveira MM, et al. PROWATERMAN – Água, Ecossistemas Aquáticos e Atividade Humana – uma Abordagem Integrada e Participativa na Definição de Estratégias Inovadoras e Prospectivas de Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Sul de Portugal. Projeto da Fundação para a Ciência e Tecnologia. Coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Livro final. 2013. 658 pp.
- [13] Agência Portuguesa do Ambiente. Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais. Lisboa; 2008. Available from: <http://insaar.apambiente.pt>
- [14] Tavares A, Madeira CP, Barreiros C, et al. Plano de gestão de resíduos hospitalares em centros de saúde. Ministério da Saúde. Direcção Geral da Saúde. Divisão de Saúde Ambiental; 2007. 112 pp. ISBN 978-982-675-171-7
- [15] Leitão, T.E., Mota, R., Novo, M.E., Lobo-Ferreira, J.P., 2014. Combined Use of Electrical Resistivity Tomography and Hydrochemical Data to Assess Anthropogenic Impacts on Water Quality of a Karstic Region: A Case Study from Querença-Silves, South Portugal. *Environmental Processes* 1, 43–57. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0002-1>.
- [16] DEMEAU. Guidelining protocol for soil-column experiments assessing fate and transport of trace organics. 2014. Deliverable 12.3. 54 pp.
- [17] Martins T, Leitão TE, Barbosa AE, et al. Assessment of soil characteristics for managed aquifer recharge using soil-column experiments. Comunicação apresentada no âmbito do 10.º Seminário de Águas Subterrâneas. Universidade de Évora; 2014. 4 pp. http://www.aprh.pt/10sas/pdf/10sas_livro-resumos.pdf
- [18] CEN/TS14405:2004 technical specification – characterization of waste – leaching behaviour tests – up-flow percolation test (under specified conditions). European Committee for Standardization; 2004. 25 pp.
- [19] EPA. Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals. 530-SW-87-006-F. United States Environmental Protection Agency; 1992. 116 pp.