

Fluxos subterrâneos para a Lagoa Mangueira (RS)

Carlos F. F. de Andrade¹, Idel C. B. Milani², Karina K. Attisano³, Luis Felipe H. Niencheski⁴, Isaac R. dos Santos⁵, Willian Burnett⁶, Márcio R. Milani⁷ & Leonardo Contreira⁸

^{1,2}Doutorandos do Curso de Oceanografia Física Química e Geológica – FURG, Rio Grande, RS – pgofcfa@furg.br; idelmilani@gmail.com

³Doutoranda do Curso de Oceanografia Biológica – FURG, Rio Grande, RS – karina.attisano@gmail.com

^{4,7}Departamento de Química – FURG, Rio Grande, RS – dqmhidro@furg.br, marcmila@vetorial.net

⁵Doutorando da Florida State University - Tallahassee, FL, USA – santos@ocean.fsu.edu

⁶Departamento de Oceanografia - Florida State University, Tallahassee, FL, USA – wburnett@fmailer.fsu.edu

⁸Mestrando do Curso de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS – leonardocontreira@yahoo.com.br

RESUMO: Em um balanço hídrico, diversas parcelas de contribuição são inseridas, tais como precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial. Uma variável normalmente não contemplada é a água subterrânea, a qual pode ser significativa tanto em volume de água quanto em qualidade. A Lagoa Mangueira por não apresentar expressivos tributários, as taxas de advecção subterrânea parecem ser dominantes para a manutenção de sua riqueza ecológica. Este trabalho estima os fluxos de advecção de nutrientes e metais mediante a utilização de ²²²Rn e apresenta uma forma alternativa de estimar fluxos de advecção de água baseado na Lei de Darcy. O estudo indicou que aportes subterrâneos contribuem para o enriquecimento e a manutenção das concentrações de elementos dissolvidos nas águas superficiais da Lagoa Mangueira

PALAVRAS-CHAVE: traçadores geoquímicos água subterrânea; fluxos

ABSTRACT: The importance of the groundwater discharge into coastal environments is becoming increasingly because of the potential significance as a source dissolved elements. Since the concentrations of elements dissolved in groundwater are often higher than surface waters, even small amount of groundwater may have important effects. The waters of Mangueira Lagoon (RS) are rich in nutrients and as this does not present expressive tributaries, the groundwater advection taxes is dominant. This paper esteem the groundwater advection flows by means of the use of ²²²Rn and the Darcy's Law. These important water flows act as source of nutrients and elements trace for superficial waters of the Mangueira Lagoon.

KEYWORDS: geochemical tracers; groundwater; discharge

1. INTRODUÇÃO

A região costeira do Rio Grande do Sul é privilegiada pelo grande número de rios e lagoas, destacando-se em volume de água a Laguna dos Patos e as Lagoas Mirim e Mangueira. O sistema lagunar Mirim-Mangueira tem seu uso voltado para diversas atividades, tais como pesca, recreação e irrigação. Grande parte da região compreendida entre esse sistema é utilizada para a atividade orizícola e pecuária de extensão e as águas subterrâneas da região são intensamente utilizadas para abastecimento doméstico da população rural.

O volume de água da Lagoa Mangueira está condicionado às descargas superficiais sazonais, como índice de precipitação e evaporação, e a seus múltiplos usos, seja por atividades econômicas ou consumo humano. Outra potencial fonte de aportes de água, não tão evidente, e significativa em termos de nutrientes e outros elementos, são as descargas subterrâneas, podendo estas serem responsáveis pelo enriquecimento [10;12] e a manutenção destes elementos nas águas superficiais da Lagoa Mangueira. A avaliação da parcela de contribuição subterrânea da região possibilita um melhor refinamento do balanço hidrológico desse sistema lagunar e a avaliação da real contribuição desta para o enriquecimento das águas superficiais.

Existem diferentes métodos para quantificar descargas de água subterrânea, cada um com suas vantagens inerentes, dentre eles destacam-se os traçadores naturais geoquímicos, a utilização de piezômetros e os seepage meters. Uma das formas de abordagem mais atuais é a que utiliza os radioisótopos naturais como o ^{222}Rn [4], a qual apresenta grandes vantagens por disponibilizar resultados de medidas diretas *in situ* com alta confiabilidade, porém, seu uso é restrito a poucos grupos de pesquisa, por ser caro e necessitar de pessoal qualificado ou capacitado para este fim. Um modelo alternativo para estimativa de fluxos, porém pouco utilizado ainda, é o baseado na Lei de Darcy [8] o qual também pode ser aplicado a fim de expressar as descargas subterrâneas. A principal vantagem deste método é o baixo custo uma vez que dados simples de condutividade hidráulica, nível do lençol freático em relação ao nível da lagoa podem ser aplicados para obtenção das estimativas de fluxos. Porém ainda necessita um maior aprofundamento no conhecimento desta ferramenta para a garantia na qualidade dos fluxos gerados.

A fim de investigar a importância dos aportes subterrâneos no enriquecimento e manutenção dos teores de nutrientes e metais dissolvidos nas águas superficiais da Lagoa Mangueira, foram avaliados os fluxos destes elementos, mediante a utilização de ^{222}Rn , sendo proposto um método alternativo para estimativa de fluxos de água.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A Lagoa Mangueira (Figura 1) formada no Holoceno é um sistema raso, fechado, sem efeitos de marés, e faz parte do maior complexo lagunar do mundo (sistema Patos-Mirim-Mangueira). Esta lagoa possui comprimento de 90 km e uma área de 900 km² com uma área de drenagem de tamanho similar, não apresentando tributários e nem comunicação superficial com o Oceano Atlântico, possuindo como fontes diretas a precipitação e fluxos subterrâneos.

Saídas de água deste sistema acontecem através de evaporação, fluxos sub-superficiais para o oceano, bombeamento para irrigação e fluxos superficiais sazonais em direção ao banhado do Taim, localizado ao norte da lagoa. As águas da Lagoa Mangueira estão interligadas com as águas da Lagoa Mirim e são conjuntamente utilizadas para a pesca,

recreação e irrigação das lavouras de arroz, sendo esta última, uma das principais atividades econômicas da região.

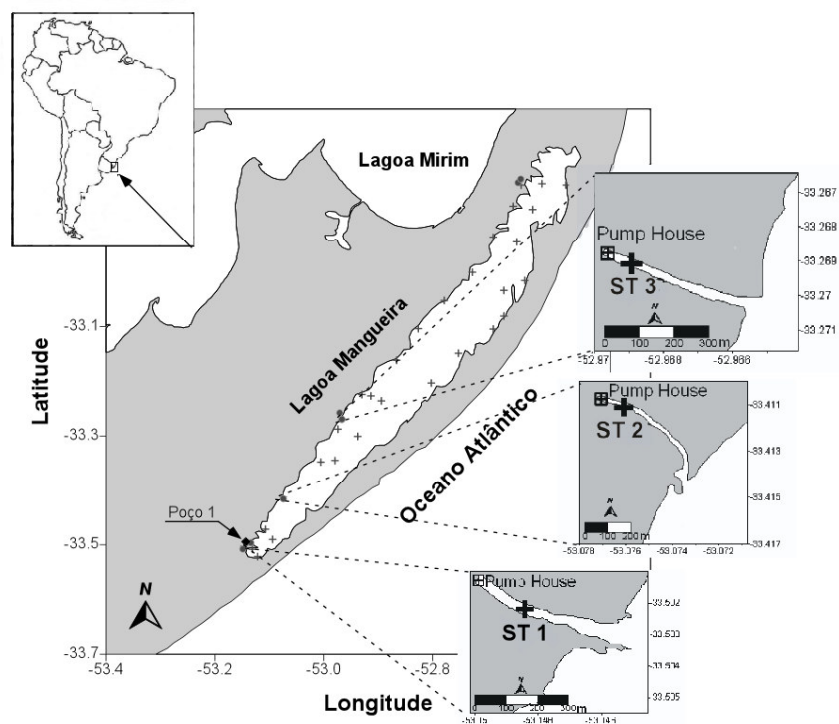


Figura 1: Localização das estações amostrais, onde os símbolos (●, + e ▲), representam a amostragens de água: em poços piezométricos; superficial da Lagoa Mangureira e em um poço permanente (poço 1).

2.1. Amostragem e análises

Águas superficiais da Lagoa Mangureira foram amostradas com auxílio de uma garrafa de Van Dorn em 29 estações (Figura 1), em agosto de 2006 e janeiro de 2007. Foram determinados os seguintes parâmetros: pH, Eh, salinidade, condutividade, nutrientes dissolvidos (PO_4^{3-} , SiO_4^{4-} , NH_4^+ , NO_2^- e NO_3^-) seguindo a metodologia descrita em Baumgarten [2] e metais traços (Pb, Fe, Cr, Cd, Cu e Zn) por técnica de espectroscopia de absorção atômica por forno de grafite, seguindo metodologia adaptada pelo Laboratório de Hidroquímica.

Águas subterrâneas foram obtidas através da perfuração de oito poços piezométricos multi-níveis à margem oeste da Lagoa Mangureira (Figura 1), de 1 a 5 metros de profundidade, com coletas a cada 1 metro. Para tal, usou-se um push point, que consiste de uma vara de aço inox de um metro de comprimento, com uma ponteira inerte. As varas de aço são acopláveis de acordo com a profundidade desejada do poço. Uma mangueira Masterflex[®], no interior dessas varas, conecta a ponteira a bomba peristáltica. A água subterrânea é filtrada em sistema fechado, em um filter holder Millipore[®] contendo filtro de acetato de celulose 0,45 μm .

Para a estimativa dos fluxos de água mediante radioisótopos naturais, radônio (^{222}Rn) foi monitorado através de séries temporais (ST), em três canais de drenagem situados na margem oeste da Lagoa Mangureira, em fluxo contínuo, com uso de um RAD-7 (DurrIDGE Co, Inc.). Medições de ^{222}Rn presente no ar, na água do lençol freático e nas águas superficiais da

Lagoa Mangueira também foram realizadas para aplicação no balanço de massa e obtenção das taxas de advecção de água.

Para obtenção de dados de pressão hidrostática interna foi instalado um sensor HOBO® em um poço permanente situado a 250m da Lagoa Mangueira com 9 metros de profundidade, correspondente às águas do lençol freático superficial (Figura 1), armazenando dados a cada 30 minutos no software HOBO Data Loggers. A condutividade hidráulica da área em estudo foi estimada por teste “slug” no poço 1.

Os dados de nível da Lagoa Mangueira foram obtidos através de medições diárias em régua. Dados de precipitação para a região em estudo foram fornecidos pela Agência da Lagoa Mirim e dados de vento pelo Banco de Dados Meteorológicos da estação principal da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). A metodologia adotada para comparação dos dados de pressão interna dos poços subterrâneos com os dados de nível da Lagoa Mangueira corresponde à utilização da variação destes dados, de forma a deixá-los adimensionais e variando numa faixa entre 0 e 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados gerados pelo sensor de pressão HOBO® no poço permanente foram plotados juntamente com dados de nível da Lagoa Mangueira, totalizando um período de sete meses (Fig.2). Uma forte correlação é evidenciada ($r=0,82$) indicando interação entre o aquífero superior com as águas da Lagoa Mangueira. Esta interação associada ao gradiente topográfico no sentido Lagoa Mangueira-Oceano Atlântico, à dominância de sedimentos arenosos permeáveis na margem oeste da Lagoa e à ausência de tributários, sugerem que a hidrogeoquímica desse ecossistema seja controlada por fluxos subterrâneos, indicando a necessidade da quantificação desses fluxos.

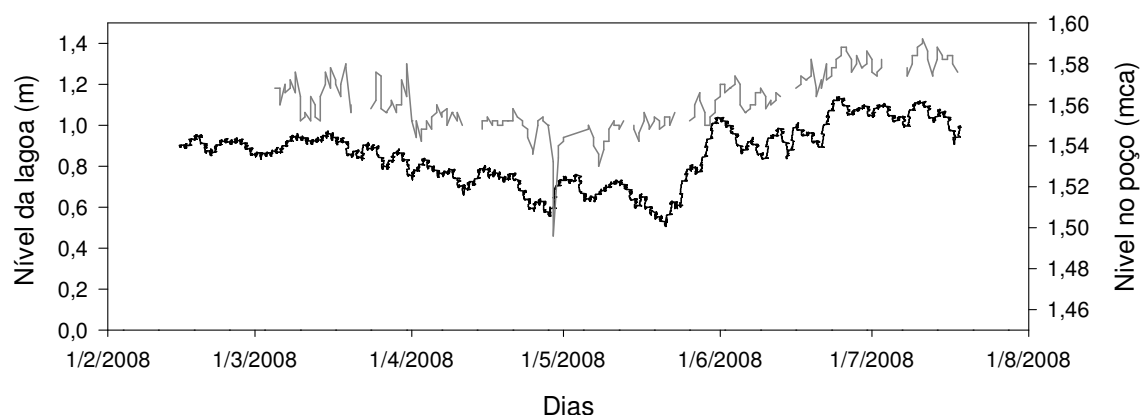


Figura 2: Nível diário em metros da Lagoa Mangueira (preto) e variação de pressão diária, em metro de coluna d'água, no poço 1 (cinza).

Os primeiros esforços foram centrados na obtenção de dados de ^{222}Rn para quantificação de fluxos de advecção de água subterrânea para a Lagoa Mangueira, os quais estão apresentados na íntegra em publicação anterior [11], cuja síntese é apresentada a seguir.

3.1. Estimativa do fluxo de água subterrânea pela atividade do radônio (^{222}Rn)

Inicialmente é apresentada uma breve descrição dos diferentes termos utilizados para a estimativa dos fluxos de advecção de água subterrânea seguido dos resultados dos fluxos de advecção obtidos para a Lagoa Mangueira, no período de inverno e verão.

3.1.1. Parâmetros para estimativa dos fluxos de advecção de água

A avaliação de descarga de água subterrânea para a Lagoa Mangueira utilizando ^{222}Rn incluiu: (1) medidas do inventário de ^{222}Rn na coluna d'água; (2) identificação das fontes de radônio do sistema; (3) determinação do fluxo total que aporta de ^{222}Rn para o balanço assim como as perdas por trocas atmosféricas e mistura; (4) cálculo do transporte advectivo requerido para estimar o fluxo de advecção total.

Assumindo que os fluxos bentônicos de ^{222}Rn ocorrem principalmente por advecção de água subterrânea, então os fluxos de água podem ser estimados dividindo os fluxos de ^{222}Rn por sua concentração na água subterrânea.

Para um estado estacionário, o balanço de massa de ^{222}Rn pode ser expresso como:

$$J_{\text{ben}} + (\lambda_{222}l_{226}) - (\lambda_{222}l_{222}) - J_{\text{atm}} - J_{\text{hor}} = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

onde J_{ben} é o fluxo bentônico de ^{222}Rn (combinação de advecção e difusão molecular); λ_{222} é a constante de decaimento para o ^{222}Rn ; l é o inventário de ^{226}Ra ou ^{222}Rn ; J_{atm} é a perda de Rn para a atmosfera; e J_{hor} representa as perdas horizontais (mistura de águas mais distantes da margem, as quais contêm baixas concentrações de ^{222}Rn). Os termos $\lambda_{222}l_{226}$ e $\lambda_{222}l_{222}$ representam a fração do radônio oriundo do decaimento do ^{226}Ra na coluna d'água e o decaimento de ^{222}Rn , respectivamente.

Devido ao bombeamento de água da Lagoa Mangueira (fundamental à atividade orizícola local) no período de verão o sinal de ^{222}Rn nos canais de drenagem pode ser mascarado e por isso foi utilizada uma forma alternativa para a Eq. (1). Foi adotada uma aproximação do estado não estacionário para deduzir as razões de descargas subterrâneas, similar ao considerado para ambientes com regime de marés [3]. Os fluxos dos canais de irrigação no verão podem ser estimados a partir da Equação 2.

$$dl_{222}/dt = (\lambda_{222}l_{226}) + J_{\text{ben}} - (\lambda_{222}l_{222}) - J_{\text{atm}} - J_{\text{hor}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Evasão atmosférica

A evasão de radônio através da interface água-ar pode ser um importante sumidouro deste elemento. Seu fluxo para a atmosfera depende da difusão molecular gerada pelos gradientes de concentração e/ou transferência turbulenta. O fluxo (J_{atm}) foi estimado conforme a Equação 3.

$$J_{\text{atm}} = k(C_w - \alpha C_{\text{ar}}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde C_w e C_{ar} são as concentrações de Rn na água e no ar (dpm m^3), respectivamente; α é o coeficiente de solubilidade de Ostwald (adimensional); e k é o coeficiente de transferência de Rn (m min^{-1}).

Perdas Horizontais:

Aplicando a teoria de estado estacionário para uma equação de advecção-difusão é possível calcular a perda horizontal, conforme a Equação 4.

$$K_h \delta^2 C / \delta x^2 - \omega \delta C / \delta x - \lambda C + P = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde C é a atividade do traçador (neste caso ^{222}Rn ; dpm m^{-3}); K_h é o coeficiente de difusão por turbilhonamento ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$); ω é a advecção horizontal (m d^{-1}); λ é a constante de decaimento do ^{222}Rn ; e P é o termo que expressa a produção do ^{222}Rn pelo decaimento de ^{226}Ra , que pode ser negligenciado devido à concentração de ^{226}Ra ser muito baixa na Lagoa Mangueira.

Fluxos difusivos do sedimento:

Fluxos difusivos de ^{222}Rn através do sedimento podem ser estimados mediante uma aproximação com as diferentes profundidades, conforme apresentado pela Equação 5:

$$J_{\text{dif}} = (\lambda D_s)^{1/2} (C_{\text{eq}} - C_w) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde λ é a constante de decaimento do ^{222}Rn ; D_s é o coeficiente de difusão no sedimento ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$); C_{eq} é a concentração de equilíbrio de ^{222}Rn nos sedimentos (dpm m^{-3}); C_w é a concentração de ^{222}Rn na água (dpm m^{-3}).

3.1.2. Fluxos de advecção de água subterrânea:

Para quantificar os fluxos de advecção de água subterrânea para a Lagoa Mangueira, atividade de ^{222}Rn foi monitorada ao longo de toda extensão da Lagoa Mangueira, no inverno de 2006 e verão de 2007. Os resultados evidenciaram advecção significativa na margem oeste da lagoa, em diferentes canais de drenagem. Estes canais são abertos às margens da Lagoa e são aprofundados para uma melhor captação de água para a orizicultura nos períodos de estiagem, favorecendo o afloramento de águas do lençol freático.

Foram realizadas séries temporais de ^{222}Rn em três canais de drenagem demonstrando que a advecção é um fenômeno significativo. Estes resultados foram utilizados para estimar as taxas médias de advecção de água subterrânea para a Lagoa Mangueira. A Tabela 1 apresenta os resultados dos diferentes parâmetros utilizados na estimativa das taxas de advecção, nos dois períodos hidrológicos.

Tabela 1. Resultados obtidos pela da série temporal do ^{222}Rn nos canais de drenagem.

Canais	Prof.	^{222}Rn	Vel. vento	$\text{IRn}^{222}\text{A}^{222}$	Jatm	$\text{IRa}^{226}\text{A}^{222}$	Jben	Taxa Adv.
	<i>m</i>	<i>dpm L⁻¹</i>	<i>m s⁻¹</i>	<i>dpm m⁻² d⁻¹</i>	<i>dpm m⁻² d⁻¹</i>	<i>dpm m⁻² d⁻¹</i>	<i>dpm m⁻² d⁻¹</i>	<i>cm d⁻¹</i>
Inverno								
ST 1	2,57 ± 0,03	6,2 ± 2,7	3,1 ± 1,3	2876	3009	14	7071	6,1
ST 2	2,14 ± 0,04	24,2 ± 3,3	3,5 ± 1,7	9364	15,508	12	26,099	22,6
ST 3	1,63 ± 0,05	12,0 ± 3,7	7,2 ± 1,4	3525	25,239	9	30,446	26,4
Verão								
ST 1	1,20 ± 0,03	0,9 ± 0,5	3,9 ± 1,7	202	1360	6	24,312	21,0
ST 2	0,54 ± 0,05	1,4 ± 1,4	3,4 ± 1,4	136	2151	3	32,073	27,8
ST 3	0,96 ± 0,08	1,5 ± 1,7	3,5 ± 1,7	260	960	5	17,627	15,2

Mediante uma relação entre a concentração de ^{222}Rn nos sedimentos permeáveis e os fluxos bentônicos (Tab. 1) é obtida uma taxa média de advecção de água subterrânea de 18,37 cm d^{-1} para o inverno e 21,33 cm d^{-1} para o verão.

Usando imagem de satélite (Google Earth) foram identificados 36 canais de drenagem, cobrindo uma área total de 0,2 km^2 na margem oeste. Pela multiplicação da taxa de advecção

média nos canais por sua área total, foi estimado um fluxo de água subterrânea antropogênica total como sendo de 36740 m³ d⁻¹ para o inverno e 42660 m³ d⁻¹ para o verão.

Embora o transporte subterrâneo não seja tão evidente quanto o superficial, o fluxo de água subterrânea é responsável por parte do abastecimento das águas da Lagoa Mangueira e sua quantificação demonstrou diferentes valores para inverno e verão, indicando maior tempo de residência dessas águas no lençol freático para o período de inverno. Esses fluxos tornam-se ainda mais importantes quando associados às concentrações de nutrientes e metais, permitindo assim, a avaliação da importância do transporte desses elementos via água subterrânea e o potencial enriquecimento das águas superficiais.

3.2. Estimativa de fluxos de nutrientes e elementos traço

Após a estimativa dos fluxos de água subterrânea para os períodos hidrológicos extremos, foi feita a avaliação da contribuição destas águas para o enriquecimento com elementos químicos nas águas superficiais da Lagoa Mangueira. Para esta avaliação, também se faz necessária a determinação dos teores destes elementos nas águas superficiais da Lagoa Mangueira.

Os teores médios de nutrientes associados à água subterrânea foram calculados pela média das concentrações nos oito poços piezométricos amostrados na margem oeste da lagoa. Esta Tabela também apresenta os teores médios dos nutrientes das águas superficiais da Lagoa Mangueira e os fluxos médios de advecção de nutrientes para a Lagoa Mangueira via água subterrânea (Tabela 2).

Tabela 2. Concentração média dos nutrientes nas águas superficiais e subterrâneas, seus respectivos desvios padrões e fluxo de nutrientes associado à água subterrânea.

	INVERNO			VERÃO		
	Superficial	Subterrânea	Fluxo	Superficial	Subterrânea	Fluxo
	μM	μM	$mol d^{-1}$	μM	μM	$mol d^{-1}$
PO₄³⁻	2,51±2,34	0,87±2,40	92,22	3,63±1,99	0,19±0,06	154,86
SiO₄⁴⁻	547,85±456,30	83,81±79,79	20128,01	770,90±372,7	116,35±13,37	32886,59
NH₄⁺	66,73±109,61	8,27±2,53	2451,66	7,93±3,34	3,60±4,36	338,29
NO₂⁻	0,16±0,09	0,16±0,09	5,88	0,54±0,44	0,14±0,02	23,04
NO₃⁻	6,36±4,67	7,73±6,42	233,67	2,48±3,07	14,23±22,26	105,80
NIT	73,25±109,18	16,16±7,24	2691,21	10,95±5,93	17,97±22,62	467,13

Como pode ser visto na Tabela 2, existe diferença de magnitude nos valores de nutrientes para os dois períodos hidrológicos avaliados, tanto nas águas superficiais quanto subterrâneas. Tal diferença pode ser atribuída ao aumento de densidade de vegetação marginal ocorrida no verão, predominantemente de macrófitas [7], as quais consomem os nutrientes dissolvidos e alteram suas formas no meio aquático.

Ao comparar os teores de nutrientes da Lagoa Mangueira com os da Lagoa Mirim apresentados por [1] ambos para o período do inverno, percebe-se que a Lagoa Mangueira é mais enriquecida em fosfato, amônio e silicato, provavelmente devido aos aportes subterrâneos, os quais carregam esses elementos.

A oxigenação das águas superficiais da Lagoa Mangueira provavelmente seja responsável pelo teor de nitrato ser mais elevado nas águas superficiais do que nas subterrâneas, seja no verão ou no inverno. Em contraste, as águas subterrâneas apresentam teores elevados de amônio, reflexo dos baixos teores de oxigênio das águas subterrâneas (3,13 mg L⁻¹ e 1,25 mg L⁻¹ para o inverno e verão, respectivamente), favorecendo assim os processos de amonificação.

Diferenças nos teores de elementos dissolvidos na Lagoa Mangueira entre os dois períodos hidrológicos devem estar associados aos diferentes processos biogeoquímicos, os quais são extremamente dependentes da temperatura, do vento, pluviosidade dentre outros. Além disto, no verão, a menor percolação da água da chuva, a maior evaporação e uso da água na lavoura, causam abaixamento do nível superficial da Lagoa Mangueira, gerando um alívio de pressão hidrostática, deslocando assim o gradiente hidráulico em sua direção. O menor tempo de residência da água subterrânea no lençol freático, faz com que estas tenham menor contato com os sedimentos, tendendo a carrear menor quantidade de elementos para as águas superficiais da Lagoa Mangueira no verão, porém diversos processos agem paralelamente, tais como a maior ciclagem de elementos decorrentes dos processos biogeoquímicos mais intensos neste período, o que pode acarretar em um equilíbrio ou até mesmo a elevação de certos nutrientes.

Visando avaliar a influência dos aportes subterrâneos contra os aportes superficiais de nutrientes em lagoas, realizou-se uma comparação entre fluxos médios de nutrientes via água subterrânea, para a Lagoa Mangueira e o aporte superficial de nutrientes para a Lagoa dos Patos (Tabela 3), pelos seus tributários, estimado por [9]. Para essa comparação, os dados foram normalizados pelas respectivas áreas de drenagem.

Tabela 3. Fluxo de adveção de nutrientes estimado para a Lagoa Mangueira comparado com os fluxos de aporte superficial de nutrientes para a Lagoa dos Patos

ESTIMATIVA DO FLUXO MÉDIO		
	Lagoa Mangueira	Lagoa dos Patos
	<i>Área de drenagem (km²)</i>	
	0,2	150432
	<i>mol d⁻¹ km⁻²</i>	
PO₄³⁻	617,68	0,33
SiO₄⁴⁻	132536,51	87,08
NH₄⁺	6974,89	1,66
NO₂⁻	72,29	0,07
NO₃⁻	848,66	6,51
NIT	7895,83	8,24

As águas subterrâneas enriquecem as águas da Lagoa Mangueira em fosfato, silicato e amônio mais intensamente que os aportes superficiais enriquecem as águas da Lagoa dos Patos (Tabela 3). Este enriquecimento pode estar associado aos processos biogeoquímicos ocorrentes na fração marginal da Lagoa Mangueira. Os teores de nitrato que aportam pelas águas superficiais na Lagoa dos Patos são superiores aos aportados pela água subterrânea na Lagoa Mangueira, provavelmente devido à maior oxigenação das águas superficiais e ao seu maior tempo de residência, favorecendo os processos de nitrificação. Quando comparamos os aportes de NIT, é verificado que os teores são similares, muito embora os processos sejam diferentes.

Além dos nutrientes, fluxos de metais dissolvidos via água subterrânea e entradas antropogênicas podem alterar a qualidade das águas superficiais da Lagoa Mangueira. A Tabela 4 apresenta os teores médios das concentrações de metais dissolvidos encontrados nas águas superficiais da Lagoa Mangueira e na água subterrânea (oito poços piezométricos amostrados na margem oeste da lagoa).

Tabela 4. Concentração média de metais traço nas águas superficiais e subterrâneas e fluxo de metais associado à água subterrânea.

	INVERNO			VERÃO		
	Superficial	Subterrânea	Fluxo	Superficial	Subterrânea	Fluxo
	<i>nM</i>	<i>nM</i>	<i>mol d⁻¹</i>	<i>nM</i>	<i>nM</i>	<i>mol d⁻¹</i>
Pb	66,60±2,36	8,64±0,97	0,32	10,18±13,18	13,47±6,61	0,57
Fe	988,35±2052,87	11866,85±19211,47	435,62	410,39±685,66	7853,41±9577,06	335,06
Cr	4,82±3,66	4,05±5,01	0,15	2,70±1,16	12,52±10,40	0,53
Cd	0,36±0,62	1,33±1,16	0,05	0,44±0,06	3,11±2,40	0,13
Cu	12,13±10,24	3,94±5,35	0,15	6,93±6,77	2,52±3,78	0,11
Zn	62,84±28,90	58,72±48,78	2,16	49,24±15,14	83,94±83,94	3,58

Dentre os metais avaliados, destaca-se a diferença de magnitude entre as concentrações de ferro encontradas para a água subterrânea quando comparadas à água superficial, indicando que o ferro é enriquecido na água subterrânea a qual atua como uma importante fonte deste elemento. Como demonstrado por [13] para a restinga da Lagoa dos Patos, o ferro é um elemento oriundo das águas subterrâneas que pode enriquecer as águas superficiais, desta forma favorecendo a produção primária. O ferro nas águas subterrâneas encontra-se predominantemente em seu estado de oxidação de 2+ e por isso em sua forma solúvel. A maior oxigenação e alta alcalinidade da interface sedimento-água superficial proporciona a oxidação do ferro ao estado trivalente e conseqüente precipitação sob a forma de hidróxido. O resultado final desses processos é a diminuição da concentração de ferro dissolvido observado na água superficial. Já para o zinco, cromo e chumbo, que não tem comportamento de redox semelhante ao ferro, o enriquecimento para a água subterrânea não é observado. O zinco ao advectar na Lagoa Mangueira tende a precipitar sendo removido da coluna d'água para os sedimentos, porém, devido ao seu caráter anfótero, pode sofrer remobilização retornando à coluna d'água, fazendo com que seus teores sejam bastante similares na água subterrânea e na superficial.

As águas superficiais estão mais enriquecidas em cobre quando comparadas às águas subterrâneas, provavelmente devido às entradas antropogênicas, como por exemplo, os insumos agrícolas utilizados nas lavouras de arroz circundantes à lagoa. Além do cobre, outros metais podem estar sendo introduzidos no meio aquático via carreamento superficial e subterrâneo nas plantações de arroz da região. Esta lixiviação dos solos pode introduzir metais pesados, como Cd, Cr, Pb e Hg, no meio aquático, além de micronutrientes como Fe, Cu e Mn. Camargo [5], avaliou os teores de metais em fertilizantes fosfatados usualmente utilizados em latossolos cultivados com arroz, similares ao solo da região em estudo. Os teores médios de Cd, Ni, Fe, Cu, Mn e Zn no superfosfato triplo foi de 1,7; 785,3; 1063; 8,9; 163,6 e 8,4 mg kg⁻¹, respectivamente. Essa carga de metais nos fertilizantes é resultado da ocorrência natural de vários metais pesados em rochas fosfáticas e de não serem eliminados no processo de manufatura. Devido à baixa permeabilidade do solo da região, o aporte de metais para a Lagoa Mangueira se torna controlado principalmente pela lixiviação dos solos do interior das lavouras em detrimento do transporte subterrâneo.

Diferenças nos teores de metais dissolvidos na Lagoa Mangueira entre inverno e verão também são evidenciadas da mesma forma que para nutrientes, provavelmente associadas aos diferentes tempos de residência da água subterrânea nestes períodos, alterando a carga de elementos dissolvidos. Além disso, existe diferença sazonal na carga antropogênica de metais via orizicultura para ambos períodos, o que pode afetar ainda mais as diferenças nos teores de metais na coluna d'água.

Conforme demonstrado anteriormente a determinação de fluxos de elementos dissolvidos associados à água subterrânea constitui uma importante fonte/aporte desses elementos para os ciclos biogeoquímicos, que são vitais para a produção primária nos

ambientes límnicos e oceânicos. Apesar dessa importância, somente recentemente estão sendo realizados estudos que permitam estimar os fluxos para os diferentes ambientes.

3.3. Estimativa do fluxo de água subterrânea através da aplicação da Lei de Darcy

O uso de radônio apresenta vantagens por disponibilizar resultados de medidas diretas *in situ* com alta confiabilidade. Entretanto, seu uso está restrito a poucos grupos de pesquisa, em função dos custos e dos recursos humanos necessários. Conseqüentemente, o volume de informações disponíveis também se torna reduzido.

Um modelo alternativo para estimativa de fluxos de águas subterrâneas, porém ainda pouco utilizado, está baseado na Lei de Darcy [8]. A principal vantagem deste método é o baixo custo, uma vez que dados simples de condutividade hidráulica, nível do lençol freático em relação ao nível da lagoa podem ser aplicados para obtenção das estimativas de fluxos.

Em 1856, Darcy enunciou a Lei do Regime de escoamento, como sendo a velocidade de percolação da água dentro de um regime de escoamento laminar, diretamente proporcional ao gradiente hidráulico. Baseado nesta Lei e considerando que na região em estudo exista um aquífero confinado, a Equação 6 apresentada em Fetter [8], foi utilizada para estimar os fluxos de advecção de água subterrânea. Tal equação envolve a estimativa da condutividade hidráulica, K_h ($m\ d^{-1}$); da declividade do gradiente hidráulico, dh/dl e da área total de advecção, A (m^2):

$$Q = K_h A dh/dl \quad (\text{Eq. 6})$$

A condutividade hidráulica foi determinada por “slug” teste realizado em um poço. O teste consiste basicamente em alterar o nível da água em um intervalo de tempo curto e monitorar o nível da água até seu retorno ao nível original. Para alteração do nível do poço, foi inserido um cano de PVC de 3,2 cm de diâmetro, 1m de comprimento, totalmente preenchido com areia ($\rho=2,5\ g\ cm^{-3}$) e água. O nível da água foi determinado com um medidor de pressão e temperatura (Hobo[®]) programado para realizar medidas a intervalos de 1 segundo. Imediatamente após a inserção do cano (ou “slug”), em queda livre, o nível da água elevou-se e retornou ao nível original rapidamente. Na retirada do cano, o nível da água baixou instantaneamente e voltou ao nível original em poucos segundos, indicando a elevada permeabilidade do aquífero em estudo.

Os resultados da variação de nível de água ao longo do tempo foram modelados de acordo com o método de Hvorslev, detalhado em Fetter [8], cujos resultados gerados são mostrados na Figura 3.

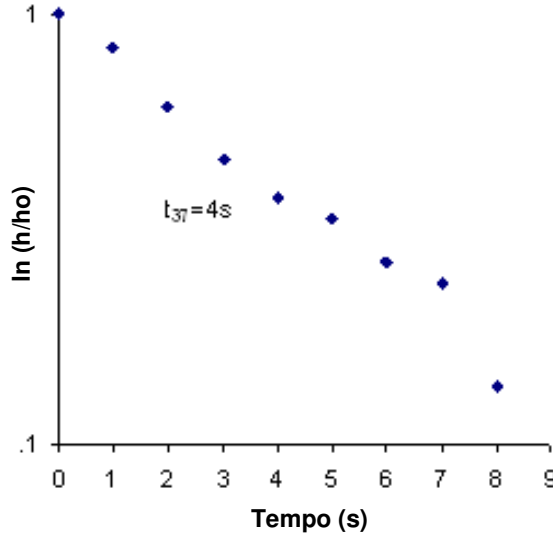


Figura 3: Razão entre o nível freático no tempo t sobre o nível freático no tempo 0 (h/ho) em escala logarítmica para o poço permanente.

A condutividade hidráulica é calculada pela Equação 7:

$$Kh = r^2 \ln (L_e \cdot R^{-1}) / 2 L_e t_{37} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde: r é o raio do poço (cm), R é o raio da ponteira (cm), L_e é o comprimento da ponteira (cm) e t_{37} é o tempo requerido para o nível da água atingir 37% do seu valor inicial após inserção do “slug”. Os valores do termo t_{37} aparecem na Figura 3.

Substituindo os valores dos diferentes parâmetros na Equação 7 foi obtida uma condutividade hidráulica de 12,0 m d⁻¹. A declividade do gradiente hidráulico é avaliada como sendo a razão entre a altura do lençol freático e a distância até a Lagoa. Como a drenagem do solo da região é pouca ou inexistente, foi assumido para a aplicação do cálculo, que não há evaporação nem infiltração da água do lençol freático. Através das cartas topográficas da Região de Santa Vitória com medições realizadas pelo Serviço Geográfico do Exército, foi possível inferir como sendo de 8m a altura do terreno em relação ao nível do mar.

A razão dh/dl é calculada pela Equação 8:

$$dh/dl = (h_1 - h_2) / L \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde h_1 é o nível do lençol freático, h_2 é o nível médio da Lagoa, ambos em relação ao nível do mar e L é a distância do poço até a margem da Lagoa.

A altura do lençol freático no poço permanente foi de 5,5 m, em relação ao nível do mar. Foi considerado um nível médio para a Lagoa Mangueira no período do inverno de 2,5 m e L como sendo de 250m. Porém, sabe-se que no verão este nível é inferior, devido a maior evaporação, maior uso pela atividade orizícola e menor precipitação atmosférica. Desta forma foi necessário calcular o nível médio da Lagoa para o verão, levando em conta a área média cultivada de arroz [6], a taxa de evapotranspiração (Estação Meteorológica da FURG) e o volume de água requerido para esta atividade, que foi calculado considerando uma taxa média de 0,015 m³ s⁻¹ ha⁻¹ de água para a irrigação no cultivo de arroz. Com estes dados foram estimados o abaixamento do nível da lagoa como sendo de 0,63m (Tabela 5). Sendo assim, foi

utilizado um volume médio do nível da Lagoa Mangueira para o período de verão como sendo de 1,87m.

Tabela 5. Dados utilizados para o cálculo do nível no verão.

Área cultivada	Volume de água requerido	Evapotranspiração	Abaixamento
(ha)	(km ³ trim ⁻¹)	(km ³)	(m)
24099,60	0,28	0,24	0,63

Fonte: FEPAM [6]

A área total de advecção foi estimada através dos 36 canais que cobrem uma área de 0,2km², sendo a mesma utilizada para a estimativa de fluxos por ²²²Rn.

Utilizando a Equação 6 foram estimados os fluxos de advecção de água para inverno e verão, como sendo respectivamente de 28800 e 34850 m³ d⁻¹.

Os resultados de fluxo de advecção de água subterrânea gerados pelos dois métodos foram bastante similares, indicando que a Lei de Darcy se mostrou uma ferramenta adequada para ser utilizada na estimativa de fluxos. Porém, um refinamento maior dos resultados pode ser obtido pelo uso de melhores parâmetros para estimar a permeabilidade média dos sedimentos e a condutividade hidráulica. Para tanto, a ampliação da rede amostral permitiria melhor estimar os fluxos de água.

O investimento na continuidade das estimativas de fluxo pela Lei de Darcy com seus aprofundamentos parece ser extremamente importante, principalmente por esta ser uma ferramenta simples e de baixo custo na obtenção de dados quando comparadas ao método da estimativa por ²²²Rn.

4. CONCLUSÃO

Fluxos de nutrientes e metais via água subterrânea contribuem para o enriquecimento das águas superficiais da Lagoa Mangueira, juntamente com os intensos processos biogeoquímicos ali ocorrentes e com aporte antrópico de elementos para a coluna d'água, tais como aquelas relacionadas a atividade orizícola desenvolvida na região.

Este trabalho demonstrou que a parcela de advecção de água subterrânea deve ser inserida no balanço hidrológico e de elementos do sistema Lagunar Mirim-Mangueira. Também ficou demonstrado que a advecção de água subterrânea está relacionada com os diferentes períodos hidrológicos. A advecção pôde ser avaliada com confiabilidade pelo método ²²²Rn, mundialmente reconhecido e comprovadamente eficaz, ou por um método alternativo baseado na Lei de Darcy, aqui proposto.

Ampliação e detalhamento deste estudo devem ser realizados tanto para a Lagoa Mangueira quanto para diversos ambientes da região, permitindo assim um avanço no conhecimento dos ambientes hídricos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Attisano, K. K., L. F. H. Niencheski, I. C. B. Milani, C. S. Machado, M. R. Milani e S. Zazur. Evidence of continental groundwater inputs to the shelf zone in Albardão, RS, Brazil. Brazilian Journal of Oceanography. no prelo.
2. Baumgarten, M. G. Z., J. M. Rocha e L. F. H. Niencheski. Manual de análises em oceanografia química. Rio Grande: Ed. da FURG. 1996. 132 p.

3. Burnett, W., J. E. Cable e D. Corbett. Radon tracing of submarine groundwater discharge in coastal environments. In: M. Taniguchi, K. Wang e T. Gamo (Ed.). Land and Marine Hydrogeology. Amsterdam: Elsevier, 2003. Radon tracing of submarine groundwater discharge in coastal environments, p.25–43
4. Burnett, W. C. e H. Dulaiova. Radon as a tracer of submarine groundwater discharge into a boat basin in Donnalucata, Sicily. Continental Shelf Research, v.26, n.7, p.862-873. 2006.
5. Camargo, M. S. D., A. R. M. D. Anjos, C. Rossi e E. Malavolta. Adubação fosfatada e metais pesados em Latossolo cultivado com arroz. Scientia Agricola, v.57, n.3, p.513-518. 2000.
6. FEPAM. Atividade de Irrigação por Comitê. C. L.M.S. Gonçalo: 305 p. 2007.
7. Ferreira, T. F., J. C. R. Fragoso, W. Collischonn e D. M. Marques. DERIVA DE ESTADOS ALTERNATIVOS DE QUALIDADE DA ÁGUA CAUSADAS POR FLUTUAÇÕES NO REGIME HÍDRICO DE LAGOS RASOS. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007. São Paulo: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007., 2007. p.
8. Fetter, C. W. Applies Hydrogeology. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2001.
9. Niencheski, L. F. e H. L. Windom. Nutrient flux and budget in Patos Lagoon estuary. The Science of The Total Environment, v.149, n.1-2, p.53-60. 1994.
10. Niencheski, L. F. H., H. L. Windom, W. S. Moore e R. A. Jahnke. Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil. Marine Chemistry, v.106, n.3-4, p.546-561. 2007.
11. Santos, I. R., F. Niencheski, W. Burnett, R. Peterson, J. Chanton, C. F. F. Andrade, I. B. Milani, A. Schmidt e K. Knoeller. Tracing anthropogenically driven groundwater discharge into a coastal lagoon from southern Brazil. Journal of Hydrology, v.353, n.3-4, p.275-293. 2008.
12. Santos, I. R., L. F. Niencheski, W. Burnett, R. Peterson, J. Chanton, C. F. F. D. Andrade, I. C. Milani e K. K. Attisano. Submarine groundwater discharge into the ocean off Mangueira Lagoon (Southern Brazil) via ^{222}Rn and radium isotopes: An exploratory study. Congresso Brasileiro de Oceanografia. Fortaleza 2008.
13. Windom, H. L., W. S. Moore, L. F. H. Niencheski e R. A. Jahnke. Submarine groundwater discharge: A large, previously unrecognized source of dissolved iron to the South Atlantic Ocean. Marine Chemistry, v.102, n.3-4, p.252-266. 2006.