



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA FÍSICA,
QUÍMICA E GEOLÓGICA**

**HIDROQUÍMICA DOS AQUÍFEROS COSTEIROS E SEU
POTENCIAL DE CONTRIBUIÇÃO NO APORTE DE
NUTRIENTES VIA DESCARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA -
SGD (RS-BRASIL)**

Gabriel Karagiannis de Souza

Dissertação apresentada à Comissão do curso de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Orientadores: Prof. Dr. Carlos Francisco Ferreira de Andrade

Prof. Dr. Luís Felipe Hax Niencheski

Rio Grande, 2015

“A vida sem luta é um mar morto no centro do organismo universal”

Machado de Assis.

AGRADECIMENTOS

A minha família, principalmente aos meus pais por todo apoio psicológico e, por vezes, financeiro, proporcionando a realização de uma etapa muito importante da minha vida.

Aos meus amigos *das antigas* e aqueles que conheci nestes anos (melhor não citar pra não esquecer ninguém), obrigado por todos os momentos vividos e a força de sempre continuar e nunca desistir.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Carlos Andrade e Prof. Dr. Felipe Niencheski, não só pelo conhecimento acadêmico, mas também pelo sentimento de amizade. Obrigado por toda atenção durante esses anos e espero que possamos sempre mantermos conectados ‘oceanograficamente’.

A todos os meus amigos da Hidroquímica (Cátia, Leonardo, Kayla, Thayane, Rafa, Camila, Carlos, Mariana, Mariele, Cacinele, Daniel, Vanderlen), obrigado pelas análises compartilhadas e as saídas à campo. Agradeço pelos debates, conversas, almoços, enfim, pelo companheirismo de sempre.

A todos os professores que me auxiliaram no conhecimento adquirido durante esses dois anos. Lembre-se que só pela profissão escolhida, para aqueles que fazem o que realmente gostam, vocês tornam-se pessoas especiais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	2
CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS COSTEIROS EM RELAÇÃO A UMA SÉRIE TEMPORAL LONGA (9 ANOS) DE DADOS HIDROQUÍMICOS.	4
RESUMO.....	4
ABSTRACT	5
1 INTRODUÇÃO	6
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	8
2.2 METODOLOGIA DE COLETA E PROCESSAMENTO	10
2.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	11
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
3.1 NUTRIENTES E PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	12
3.1.1 <i>Análise espacial</i>	13
3.1.2 <i>Análise temporal</i>	17
3.1.3 <i>Os aquíferos e seus aspectos regionais</i>	23
3.1.4 <i>Elementos maiores</i>	26
4 CONCLUSÕES.....	31
5 REFERÊNCIAS	32

CAPÍTULO II: FLUXOS DE NUTRIENTES ASSOCIADOS À DESCARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (SGD) ESTIMADA A PARTIR DA LEI DE DARCY PARA A REGIÃO COSTEIRA DA LAGOA DOS PATOS (RS-BRASIL)	38
RESUMO.....	38
ABSTRACT	39
1 INTRODUÇÃO	40
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
2.1 ÁREA DE ESTUDO	41
2.2 METODOLOGIA DE COLETA E PROCESSAMENTO	41
2.2.1 Poços permanentes (barreira).....	41
2.2.2 Poços piezométricos	42
2.2.3 Águas superficiais	42
2.3 SENSOR DE PRESSÃO	43
2.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	43
2.5 LEI DE DARCY	44
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
3.1 VARIAÇÃO DA SALINIDADE E NUTRIENTES NO ESTUÁRIO SUBTERRÂNEO E ZONA DE SURFE	45
3.2 DESCARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (SGD).....	49
3.2.1 Lei de Darcy – componente de água subterrânea continental (Q_{fw}).....	50
3.2.2 Fluxos de nutrientes associados a SGD	53
3.2.3 Influência da SGD na produtividade primária	59
4 CONCLUSÕES.....	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
6 REFERÊNCIAS	64

ANEXO: DADOS DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DOS POÇOS PERMANENTES DISTRIBUÍDOS PELA BARREIRA ARENOSA DA LAGOA DOS PATOS (RS), BRASIL	1
--	----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, mostrando os diferentes sistemas deposicionais. (Fonte: Tomazelli & Willwock, 2000).	7
Figura 2: Representação da área de estudo com a localização dos poços permanentes distribuídos na barreira arenosa da Lagoa dos Patos na forma de transectos (norte, central e sul). (Fonte: Tomazelli et al., 2000).	9
Figura 3: Análise de variância em relação as três profundidades (5, 10 e 15 metros) dos 3 poços do transecto norte para condutividade (μS) e nutrientes inorgânicos dissolvidos (μM).	14
Figura 4: Análises multivariadas em relação a variação espacial dos dados de nutrientes nos 9 poços da barreira. (A) Análise de agrupamentos; e (B) Plano fatorial da PCA, modo Q.	15
Figura 5: Análise de variância dos dados de nutrientes em relação a série amostral dos 9 anos. (A) Silicato (SiO_4); (B) Fosfato (PO_4^{3-}); (C) Nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) em micromolar (μM).	18
Figura 6: Série temporal dos dados de nível da Lagoa dos Patos (cm) (A); e precipitação bruta e acumulada anual (mm) (B), em relação aos 9 anos de dados.	19
Figura 7: Concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos (SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} e NID - μM) e nível da Lagoa dos Patos (cm) referentes a série temporal nos 9 anos de dados.	20
Figura 8: Gráfico de dispersão entre PO_4^{3-} e NID x Condutividade nos transectos norte e central nas três diferentes profundidades de cada um dos poços.	23
Figura 9: Condições de fluxos em lagos/banhados: (a) efluente; (b) influente; e (c) efluente/influente. Adaptado de Winter et al. (1998).	25
Figura 10: Diagrama de Piper para classificação das águas subterrâneas dos poços da barreira a partir das proporções entre principais cátions e ânions.	27

Figura 11: Correlação entre o somatório dos íons principais (cátions e ânions) (A), e sua relação com as concentrações dos nutrientes inorgânicos dissolvidos – SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} e NO_3^- (B, C e D) das águas subterrâneas dos aquíferos da barreira da Lagoa dos Patos.	29
Figura 12: Coleta de água subterrânea na zona de praia com auxílio de <i>Push-point</i> . Fonte: Attisano (2012).	42
Figura 13: Distribuição dos nutrientes (μM) em função da salinidade na zona de praia (estuário subterrâneo) e zona de surfe (água superficial).	48
Figura 14: Modelo conceitual dos fluxos de elementos dissolvidos no sistema costeiro subterrâneo e superficial (NIENCHESKI et al., 2007).	50
Figura 15: Fluxos médio de nutrientes (SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^-) associados a SGD (10^6 mol dia^{-1}) e F1 em diferentes cenários de alto e baixo nível da Lagoa dos Patos.	57
Figura 16: Relação molar entre o nitrogênio (N): fósforo (P) para os fluxos associados à SGD da barreira da Lagoa dos Patos.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos (μM), pH e condutividade (μS) nos poços permanentes: média e desvio-padrão da série dos 9 anos de dados com n amostral variando entre 12-23 campanhas.	12
Tabela 2: Matriz de correlação entre os dados de nível da Lagoa dos Patos (LP), precipitação acumulada e nutrientes inorgânicos dissolvidos, com médias e desvio-padrão referentes a série amostral de 9 anos.	22
Tabela 3: Concentração dos elementos maiores (cátions e ânions) nos poços da barreira dado a classificação das águas subterrâneas.	26
Tabela 4: Distribuição da salinidade e média dos nutrientes inorgânicos dissolvidos (μM) nos poços de praia e zona de surfe adjacente, referente a diversas campanhas amostrais.....	46
Tabela 5: Dados para estimativa da SGD a partir do poço 3, diferenciando os valores de condutividade hidráulica (K_h) em cada uma das profundidades.....	51
Tabela 6: Estimativa da descarga de água subterrânea (SGD) e suas componentes de água doce (Q_{fw}) e água salgada (Q_{sw}) comparando os métodos da Lei de Darcy e radioisótopos para a mesma área de estudo.	52
Tabela 7: Estimativa dos fluxos médios de nutrientes ($\times 10^6 \text{ mol.dia}^{-1}$) ilustrado na figura 13, dados médios da série temporal dos dados, anos de alto nível da LP (2010) e baixo nível da LP (2004).	54
Tabela 8: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 1 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).....	1
Tabela 9: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 2 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).....	4

Tabela 10: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 3 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).....	6
Tabela 11: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 4 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).....	8
Tabela 12: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 5 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).....	10
Tabela 13: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 6 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).....	12
Tabela 14: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 7 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).....	14
Tabela 15: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 8 na profundidades de coleta de 10 metros.	16
Tabela 16: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 9 nas três profundidades de coleta (11, 15 e 27 metros).....	17

INTRODUÇÃO GERAL

A água é parte integral do sistema terrestre e componente fundamental na dinâmica do meio ambiente. Impulsiona os diversos ciclos biogeoquímicos e está diretamente ligada a sustentação da vida na Terra (SILVEIRA, 1997; PRESS et al., 2006). Cada espaço onde a água é armazenada constitui um reservatório, como os oceanos, as geleiras, os aquíferos, os rios, a atmosfera e a biosfera. O movimento dessa água através desses reservatórios é chamado de ciclo hidrológico, que interage com os mais variados componentes da atmosfera, do oceano e da paisagem, no qual a principal característica do volume de água são a sua instabilidade e mobilidade no ambiente (PRESS et al., 2006).

A água subterrânea, foco deste estudo, é parte de um processo dinâmico do ciclo hidrológico onde a água circula do oceano para a atmosfera (evaporação), desta para os continentes (precipitação), retornando via superficial e subterrânea ao oceano (FEITOSA, 2000). Uma vez na condição subterrânea, esta água possui uma dinâmica própria, determinada basicamente, a partir das características geológicas do aquífero e de seus sistemas de fluxos (local, intermediário ou regional). Dependendo do tipo de aquífero, este pode sofrer constante recarga (chuvas e corpos hídricos, por exemplo), além da interferência direta e indireta das ações antrópicas (RIBEIRO et al., 2007). A composição físico-química das águas subterrâneas é resultante do enriquecimento mineral das águas provenientes do ciclo hidrológico (ar, superfície e solo) e do seu tempo de residência no aquífero ou rocha hospedeira (RIBEIRO et al., 2007). Dessa forma, a água subterrânea possui sua assinatura definida pelos sedimentos que está em contato, podendo interferir ou ser interferida diretamente pelos corpos de águas superficiais (WINTER, 1998).

Levando em consideração que, geralmente as águas subterrâneas possuem concentrações dos nutrientes mais elevadas que as águas superficiais, é de grande importância avaliar seus aportes e as fontes hídricas envolvidas neste processo (WINDOM et al., 2006; LEE et al., 2011; SANTOS & EYRE, 2011). Atualmente, inúmeros estudos vêm sendo desenvolvidos em relação a descarga de água subterrânea (SGD, Submarine Groundwater Discharge) (MOORE, 1999; BURNETT et al., 2002; BURNETT, 2003; WINDOW & NIENCHESKI, 2006; NIENCHESKI et al., 2007; MOORE, 2010; CHARETTE et al., 2012),

destacando a importância desse processo nos sistemas costeiros tanto em relação ao seu volume, quanto a sua relevância química e ecológica.

A SGD é definida como todo e qualquer fluxo de água em margens continentais para o oceano através da interface sedimento-coluna d'água (MOORE, 1999). Pode abranger grandes ou pequenas áreas nas escalas de metros a quilômetros, independentemente da composição do fluido e das forçantes que as envolve (BURNETT et al., 2003). A SGD torna-se um dos processos fundamentais e típicos das interações continente/oceano nas zonas costeiras (MOORE, 2010; CHARETTE et al. 2012) e possui significativa importância no transporte de substâncias dissolvidas para esses ambientes (BURNETT et al. 2006; SLOMP & VAN CAPPELLEN, 2004; MOORE, 2010).

Dessa forma, o presente estudo foi dividido em dois capítulos. O primeiro aborda a caracterização dos aquíferos costeiros da barreira arenosa entre a Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico com base em uma série temporal de nove anos de dados de nutrientes e parâmetros físico-químicos. O segundo capítulo envolve a quantificação e estimativa da descarga de água subterrânea (SGD) para a mesma área de estudo a partir da aplicação da Lei de Darcy, um método antes nunca apresentado nesta região, além dos fluxos dos nutrientes associados a SGD e seu potencial de contribuição para a produtividade primária na zona costeira adjacente.

REFERÊNCIAS

- BURNETT, W.; BOKUNIEWICZ, H.; HUETTEL, M.; MOORE, W. S.; TANIGUCHI, M. 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*. v. 66 (3), 3 - 33.
- CHARETTE, M. A., DULAIIOVA, H., GOMMEEA, M. E., HENDERSON, P. B., MOORE, W. S., SCHOLTEN, J. C., PHAM, M. K. 2012. GEOTRACES radium isotopes interlaboratory comparison experiment. *Limnol. Oceanogr.* v. 10, 451–463.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. 2000. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*, 2ed., CPRM, UFP, LABHID: Fortaleza, 2000.

- LEE, C. M., JIAO, J. J., LUO, Z., MOORE, W. S. 2011. Estimation of submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes in Tolo Harbour, Hong Kong. *Science of The Total Environment*. v. 433, 427-33. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.073.
- MOORE, W. S. 1999. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water. *Marine Chemistry*. v. 65: 111–125.
- MOORE, W. S. 2010. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, v. 2, 59–88. DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081019.
- NIENCHESKI, L. F. H., WINDOM, H. L., MOORE, W. S.; JAHNKE, R. A. 2007. Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil. *Mar. Chem.* v. 106 (3-4), 546-561.
- PRESS, F., SIEVER R., GROTZINGER, J. & JORDAN, T. H. 2006. Para Entender a Terra. Tradução Rualdo Menegat, 4 ed. – Porto Alegre: bookman, 656 p.: il.
- RIBEIRO, M. L., LOURENCETTI, C., PEREIRA, S. Y. P., MARCHI, M. R. R. 2007. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, v. 30, n. 3, 688-694.
- SANTOS, I. R., EYRE, B. D. 2011. Radon tracing of groundwater discharge into na Australian estuary surrounded by coastal acid sulphate soils. *Journal of Hydrology*. v. 396, 246-257. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.11.013.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfi ca. In TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Edusp / ABRH, 1997, 35-51p.
- SLOMP, C. P. & VAN CAPPELLEN, P. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *Journal of Hydrology*. v. 295 (1-4), 64 - 86.
- WINDOM, H., MOORE, W. S., NIENCHESKI, L. F., JAHNKE, R. 2006. Submarine groundwater discharge: a large, previously unrecognized source of dissolved iron to the South Atlantic Ocean. *Mar. Chem.* v. 102, 252 - 266.
- WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. 1998. Groundwater and surface water: a single resource. U. S. Geological Survey Circular 1139. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/#pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2015.

CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS COSTEIROS EM RELAÇÃO A UMA SÉRIE TEMPORAL LONGA (9 ANOS) DE DADOS HIDROQUÍMICOS.

RESUMO

Os intrínsecos processos da formação da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), como a presença de grandes corpos hídricos como a Lagoa dos Patos e inúmeras lagoas costeiras nesta região, juntamente com as características texturais dos sedimentos, contribuíram significativamente no desenvolvimento dos aquíferos costeiros deste ambiente. Com o objetivo de entender como este sistema atua na dinâmica dos nutrientes, caracterizou-se os aquíferos fazendo uso de dados hidroquímicos coletados ao longo de 9 anos, tais como os parâmetros físico-químicos e os nutrientes inorgânicos dissolvidos, analisados em água de poços distribuídos pela barreira arenosa que separa a Lagoa dos Patos (LP) do Oceano Atlântico. Através de análises estatísticas descritivas e multivariadas constatou-se que ao longo da série temporal, a concentração dos nutrientes dos aquíferos costeiros da barreira é bastante variável, dependente, principalmente, de suas fontes de recarga, como o nível da LP e a precipitação pluviométrica. No caso da variação espacial, a concentração dos nutrientes dos poços distribuídos na barreira não apresentou relação com as diferentes barreiras deposicionais da formação da PCRS. Porém as características regionais de cada sistema de aquíferos, como a presença de sangradouros, demonstrou alterar a concentração e, portanto, a disponibilidade dos nutrientes nas águas subterrâneas. Por fim, a análise de elementos maiores a partir do diagrama de Piper mostrou grande influência de água marinha nas águas dos aquíferos da barreira pelos altos teores de Na^+ e Cl^- . Ambas as abordagens (análise espacial, temporal e de classificação das águas) mostram que os aquíferos costeiros da região fazem parte de um sistema dinâmico e que têm relação com fatores externos e individuais de cada ambiente, com os maiores teores de nutrientes em cenário de menor nível da LP e, conseqüentemente, menores índices de precipitação pluviométrica.

Palavras-chave: aquíferos; nutrientes; água subterrânea.

ABSTRACT

The intrinsic processes of the formation of the Coastal Plain of the Rio Grande do Sul (CPRS), as the presence of large water bodies such as the Patos Lagoon and numerous coastal lagoons in this region, along with the textural characteristics of the sediments, contributed significantly in the development of coastal aquifers this environment. Aiming to understand how this system operates in nutrients dynamics, the aquifer was characterized making use of hydrochemical data collected over 9 years such as the physical and chemical parameters and dissolved inorganic nutrients in wells distributed by sandy barrier that separates the Patos Lagoon (PL) of the Atlantic Ocean. Through descriptive and multivariate statistical analysis it was found that over the time series, the concentration of nutrients in coastal aquifers barrier is highly variable, dependent mainly on its sources of recharge, as the level of LP and rainfall. In the case of spatial variation, the concentration of nutrients from wells distributed at the barrier was not associated with different deposition barriers to the formation of CPRS. However, regional characteristics of each aquifer system such as the presence of washouts, shown change the concentration and, therefore, the availability of nutrients in groundwater. Finally, the analysis of major elements from the Piper diagram showed great influence of sea water in the aquifers by high contents of Na^+ and Cl^- . Both approaches (spatial and temporal analysis, classification of water) shows that coastal aquifers are part of a dynamic system that are related to external and individual factors from each environment, with the higher nutrients contents in lower water level of PL and, consequently lower precipitation rates.

Keywords: Aquifers; nutrients; groundwater.

1 INTRODUÇÃO

O Estado do Rio Grande do Sul possui uma linha de costa de aproximadamente 625 Km de extensão, sendo a mais ampla planície costeira do Brasil. Encontra-se na porção mais superficial e próxima do pacote sedimentar da Bacia de Pelotas que mantém bem preservado o registro sedimentar Cenozóico do Estado (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000). A planície costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), de acordo com VILLWOCK & TOMAZELLI (2007), desenvolveu-se, basicamente, a partir de dois tipos de sistemas deposicionais durante o Quaternário: (1) Sistema de Leques Aluviais, na porção mais interna, próximo às áreas-fonte; e (2) Sistema tipo Laguna-Barreira, na porção leste, cuja formação foi controlada por quatro grandes eventos transgressivos-regressivos do oceano (Sistemas Laguna-Barreira I, II, III e IV) (Figura 1).

As barreiras geradas foram responsáveis pela formação dos grandes corpos lagunares no Estado do Rio Grande do Sul, caracterizando de forma única a paisagem desta região costeira, onde destacam-se a Lagoa dos Patos (LP), a Lagoa Mirim e a Lagoa Mangueira (BARBOZA et al., 2009). Os quatro sistemas deposicionais (Barreiras I, II, III e IV) correspondem depósitos sedimentares predominantemente arenosos de origem praial e eólica e areno-lamosos de origem lagunar. As fácies sedimentares decorrentes destes sistemas deposicionais foram, então, moldadas pelos processos internos (de cada sistema), e externos, como o tectonismo, as variações climáticas e as flutuações do nível relativo do mar durante o período Cenozóico (VILLWOCK & TOMAZELLI, 2007).

No cordão arenoso que separa a Lagoa dos Patos do Oceano Atlântico, foco de estudo deste trabalho, ainda encontram-se preservadas a Barreira III, terceiro evento transgressivo-regressivo no Pleistoceno, onde seu desenvolvimento impôs a implantação final do Sistema Lagunar Patos-Mirim; a Barreira IV, mais recente sistema deposicional do tipo laguna-barreira que se desenvolveu no Holoceno, conseqüente a última transgressão pós-glacial neste período. Este sistema é constituído por um conjunto complexo de ambientes deposicionais que coexistiram lado a lado, ou cresceram temporal e/ou espacialmente uns nos outros, como a Lagoa Mangueira, por exemplo (VILLWOCK & TOMAZELLI, 1995). Constituída fundamentalmente por areia praial e eólica, a progradação da Barreira IV deu-se, sobretudo, através da construção de cordões litorâneos regressivos, onde suas características são

conservadas atualmente em praticamente toda a planície costeira do Estado (VILLWOCK & TOMAZELLI, 2007). Além do sub-sistema Lagunar, constituído por um complexo conjunto de ambientes e subambientes deposicionais, como corpos aquáticos costeiros (lagos e lagoas), sistemas aluviais (rios meandранtes e canais inter-lagunares), sistemas paludiais e sistemas deltaicos (TOMAZELLI, 1990; TOMAZELLI & VILLWOCK, 1991).

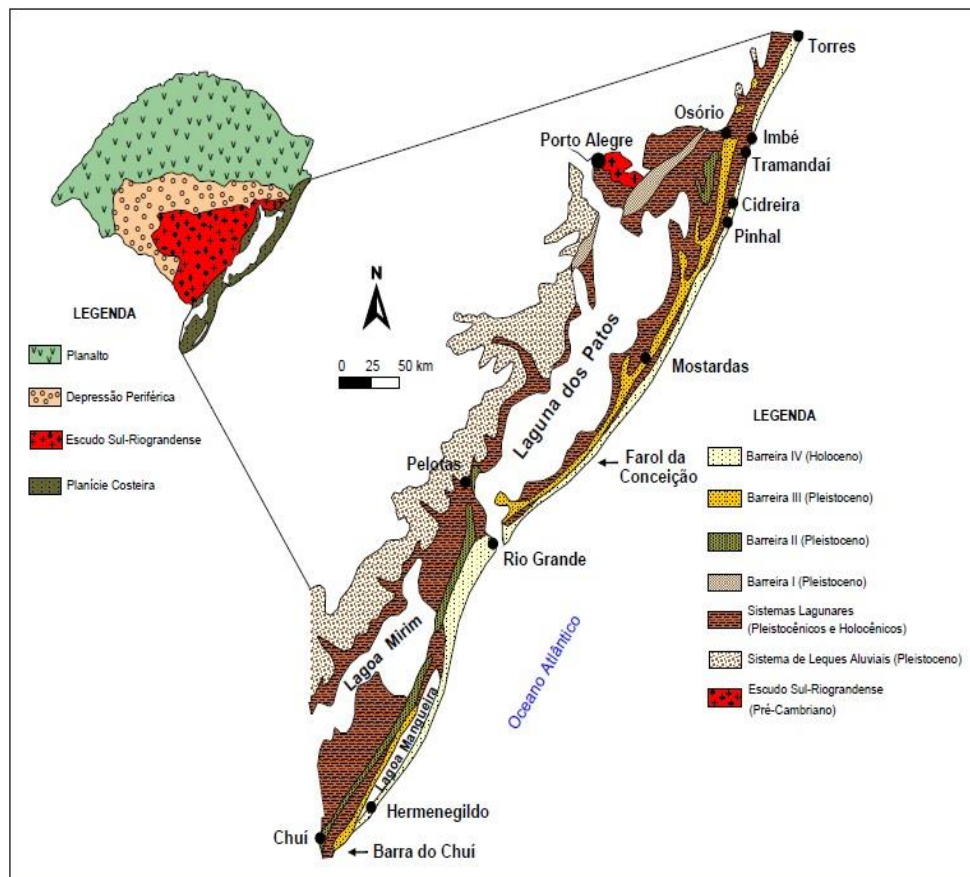


Figura 1: Mapa simplificado da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, mostrando os diferentes sistemas deposicionais. (Fonte: Tomazelli & Willcock, 2000).

A singularidade da PCRS, comparada com o restante do país, fez com que diversos autores (WINDOM & NIENCHESKI, 2003; WINDOM et al., 2006; NIENCHESKI et al., 2007) buscassem resposta em relação ao estudo do transporte advectivo de substâncias através dos sedimentos permeáveis e a extensão da descarga direta de água doce de aquíferos costeiros, bem como a mistura com a água do mar, recirculada através dos sedimentos. Mee (1978) afirma que barreiras com influência de lagoas costeiras (cerca de 13% da costa do planeta) são favoráveis a troca de água subterrânea entre o continente e o oceano, desenvolvendo o que

chamamos de estuários subterrâneos, com comportamento bem parecido com os estuários superficiais (MOORE, 1999).

Diversos autores já demonstraram que a região em estudo está sob a influência desses processos, onde o fornecimento dos nutrientes via descarga subterrânea em zonas costeiras favorece o crescimento fitoplanctônico (WINDOM et al., 2006; NIENCHESKI et al., 2007). Em alguns locais do mundo, alguns estudos vêm demonstrando casos mais extremos, no qual os efeitos deletérios como a eutrofização local ou ‘blooms’ de algas nocivas podem ocorrer devido o processo da SGD (GARCÉS et al., 2011; LEE et al., 2010; VALIELA et al., 1990). A respeito disso, é de grande relevância um melhor conhecimento dos aquíferos costeiros que possuem esta forte influência na zona costeira, a fim de identificar os processos que podem alterar sua qualidade hidroquímica e, conseqüentemente, alterar a qualidade da água de parte da região costeira adjacente.

Dessa forma, o estudo tem como objetivo avaliar a qualidade hidroquímica das águas presentes nos aquíferos costeiros do cordão arenoso que separa a Lagoa dos Patos do oceano e, a partir do banco de dados de nutrientes, determinar a assinatura química que cada sistema deposicional integra na concentração destes parâmetros, verificando a variabilidade interanual, espacial e fontes externas (fontes de recarga) que podem alterar a qualidade química desses aquíferos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O ambiente de estudo é determinado como um sistema barreira formado durante a transgressão marinha pós-glacial do Holoceno (WINDOW & NIENCHESKI, 2003). É denominado por um cordão arenoso que separa a Lagoa dos Patos do oceano, caracterizado pela presença de sedimentos permeáveis que ocupa os 625 Km de linha de costa. Localiza-se na região central do litoral do Rio Grande do Sul, abrangendo toda a margem leste da Lagoa dos Patos (DILLENBURG et al. 2002) (Figura 2).

A Lagoa dos Patos resultou, sobretudo, dos processos deposicionais ocorridos até a formação da planície costeira do Rio Grande do Sul. Situada entre 30° e 32° Sul, é a maior

lagoa costeira do Brasil, possuindo aproximadamente 250 Km de extensão e largura média de 60 Km. Tem um perfil alongado no sentido NE-SW e é considerado um corpo hídrico relativamente raso, com profundidade média de 6 metros (CASTELÃO & MOLLER JR, 2003). Sua sedimentologia é caracterizada por sedimentos que variam de areia grossa a muito fina (silte e argila), porém com predominância de sedimentos grosseiros. Representado como um importante corpo hídrico na região, a Lagoa dos Patos é responsável pela drenagem hídrica de metade da área do Estado (200.000 Km²), na qual recebe aporte de vários rios, como o Camaquã, Guaíba e a Lagoa Mirim a partir do Canal São Gonçalo. Além disso, juntamente com o Rio da Prata, é a única fonte de água doce para a região costeira contígua (CASTELLO & MÖLLER JR, 1977).

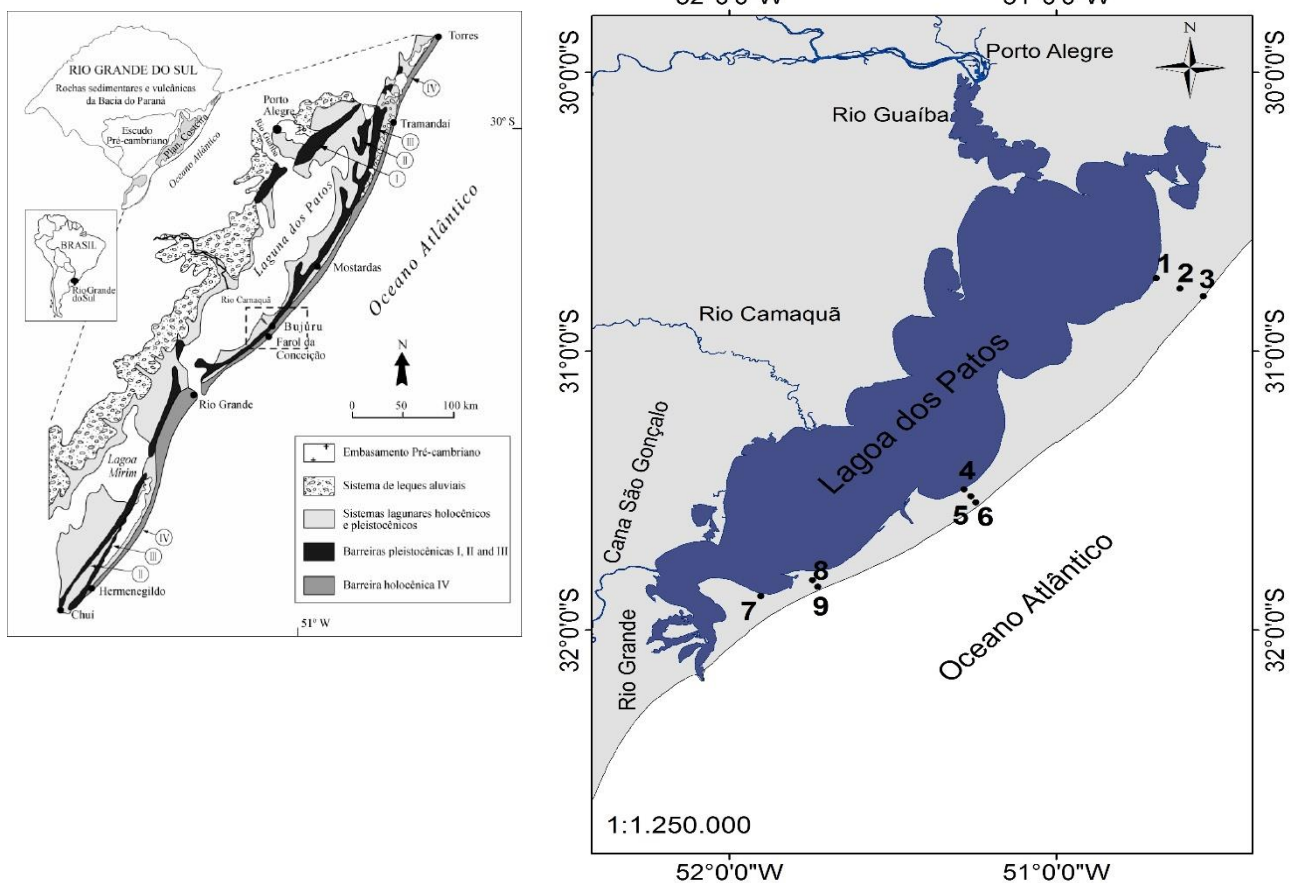


Figura 2: Representação da área de estudo com a localização dos poços permanentes distribuídos na barreira arenosa da Lagoa dos Patos na forma de transectos (norte, central e sul). (Fonte: Tomazelli et al., 2000).

Em relação a hidrodinâmica da Lagoa dos Patos, seu período de alta vazão ocorre no inverno (junho-agosto), onde sua circulação é impulsionada apenas pela descarga de água doce e o seu tempo de residência é considerado curto, cerca de 3 dias. O oposto ocorre no período de verão, no qual a circulação de ventos e seu tempo de residência são consideravelmente maiores (8 dias). A costa sul do Brasil é caracterizada como uma região de mínima influência de maré, com amplitude média de 0,47m e predominantemente semi-diurna (HERZ,1977). Dessa forma, os regimes de fluxos superficiais da Lagoa dos Patos, como a saída de água continental e a entrada de água marinha através dos Molhes da Barra de Rio Grande, são controlados, principalmente, pela ação dos ventos e da chuva, relacionados aos desníveis que ocorrem dentro da Lagoa e na zona costeira (MACHADO, 2007; CALLIARI, 1980).

A barreira arenosa que separa a lagoa do oceano é composta por sedimentos grosseiros clásticos, com mistura de conchas e grãos mais finos de depósito lagunar. Sua maior elevação está associada as dunas, que chegam a 20m, porém com nível médio de poucos metros (DILLENBURG et al., 2002). Dessa forma, existe um significativo fluxo de água doce através dos sedimentos permeáveis da barreira, que se mistura com a água do mar, dependente do fluxo da lagoa. Há um predomínio de fluxo de água subterrânea em direção ao oceano, porém, durante baixo fluxo da lagoa, pode haver alguma troca de água entre o mar e a lagoa costeira, formando um estuário subterrâneo (NIENCHESKI et al., 2007).

2.2 METODOLOGIA DE COLETA E PROCESSAMENTO

Os poços subterrâneos nos quais efetivaram-se as amostragens de água subterrânea estão distribuídos pela barreira arenosa, correspondendo a três conjuntos de poços de PVC com três deles em cada conjunto e em três diferentes profundidades, exceto para o poço 8 com apenas uma profundidade, totalizando 25 poços. Estes conjuntos dispõem-se na parte norte, central e sul da lagoa (célula norte, central e sul, respectivamente), sendo três poços próximo a lagoa, três poços próximos ao mar e outros três entre eles com profundidades de 5, 10 e 15 metros. As coletas de água subterrânea foram realizadas nesses conjuntos de poços, nas três profundidades citadas, totalizando nove poços incluídos nas três células. Os dados abrangem uma série temporal de 9 anos, desde 2003 a 2012, exceto no ano de 2008 pela falta de amostragem, com coletas distribuídas nas diferentes estações do ano.

A coleta das amostras de água dos poços foi realizada com o auxílio de uma bomba peristáltica e mangueira Masterflex® previamente lavadas. Primeiramente, a água presente nos poços foi drenada e descartada por um tempo determinado até reposição da água nos poços. Em seguida, as amostras foram filtradas em campo com suporte Aqua Prep 600® e filtro de 0,45 µm, coletadas diretamente em frascos de polietileno previamente limpos. Por último, as amostras foram armazenadas, identificadas e mantidas sob refrigeração até a chegada ao laboratório, e assim, congeladas até o momento das análises. Esse procedimento foi padrão para os nove anos de coleta dos dados.

2.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Os parâmetros analisados foram categorizados em parâmetros físico-químicos (Temperatura, salinidade, condutividade, pH e oxigênio dissolvido); e nutrientes inorgânicos dissolvidos (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SiO_4^{4-}). Entre os parâmetros físico-químicos que foram analisados *in situ*, pH, salinidade, condutividade e temperatura foram determinados utilizando, respectivamente, pHmetro (Metler Toledo MO120) e termossalinômetro (YSI 30, Yellow Springs). Oxigênio dissolvido através de Oxímetro Hoestch®. Todos os equipamentos foram calibrados seguindo as normas do fabricante. Em relação aos nutrientes inorgânicos dissolvidos, ambos foram determinados a partir do método colorimétrico clássico de Strickland & Parsons (1972), seguindo recomendações descritas em Baumgarten et al. (2010). As estimativas de precisão das análises são: fosfato, $\pm 0,03 \mu\text{M}$; silicato, $\pm 0,15 \mu\text{M}$; amônia, $\pm 0,1 \mu\text{M}$; nitrito, $\pm 0,02 \mu\text{M}$; nitrato, $\pm 0,05 \mu\text{M}$.

A concentração dos elementos maiores foi determinada a partir do método de cromatografia iônica. Posteriormente, foi utilizado o diagrama de Piper para classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto as proporções dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{+2} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) e ânions principais (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) em dois diagramas triangulares respectivos, combinando as informações dos dois triângulos em um losango situado entre os mesmos (BACK, 1966; PIPER, 1994; LUCENA et al., 2004). Os gráficos mostram as proporções relativas dos íons principais, mas não suas concentrações absolutas. O diagrama foi feito através do software gratuito QualiGraf® desenvolvido em 2001 pelo Departamento de Recursos Hídricos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). É uma

ferramenta frequentemente utilizada para auxiliar na parte gráfica das análises mais usuais de qualidade de amostras de água.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 NUTRIENTES E PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

A Tabela 1 apresenta as concentrações médias e seus respectivos desvios-padrão das amostras coletadas nos poços permanentes distribuídos pelo cordão arenoso da Lagoa dos Patos. Os dados representam uma série de nove anos de resultados dos teores de nutrientes (SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} e NID - $\text{NH}_4 + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) e parâmetros físico-químicos, como condutividade elétrica e pH, nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros). As campanhas amostrais abrangem os anos de 2003 a 2012, com exceção de 2008, com um n amostral de 12-23, variadas em diversas épocas do ano (verão, outono, inverno e primavera).

Tabela 1: Concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos (μM), pH e condutividade (μS) nos poços permanentes: média e desvio-padrão da série dos 9 anos de dados com n amostral variando entre 12-23 campanhas.

Poços	Prof. (m)	pH		Condutividade		Silicato – SiO_4		Fosfato – PO_4^{3-}		N amoniacal – NH_4^+		Nitrito – NO_2^-		Nitrito – NO_3^-	
		AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD	AVG	STD
1	5	6,98	0,39	494,15	156,69	867,90	504,62	4,33	1,75	25,89	15,19	0,73	2,00	3,99	5,85
	10	7,20	0,39	557,41	54,80	920,25	578,20	4,17	1,73	22,92	8,52	0,33	0,76	2,63	2,38
	15	7,21	0,33	904,00	134,50	859,29	550,64	4,72	2,96	18,56	12,46	0,89	2,91	5,68	11,39
2	5	5,93	0,52	273,23	252,55	320,88	286,10	1,84	2,02	15,15	21,00	1,07	2,40	1,97	2,11
	10	5,90	0,41	184,78	53,86	250,94	183,29	1,77	3,35	6,34	4,46	0,18	0,08	3,56	5,70
	15	6,00	0,44	180,96	50,71	336,53	278,23	5,98	10,42	30,94	38,09	0,89	0,54	6,31	10,22
3	5	6,55	0,44	181,53	23,12	539,73	279,40	2,22	1,05	11,23	5,98	0,29	0,18	1,72	1,82
	10	6,65	0,54	241,69	264,52	691,17	368,40	6,57	4,08	13,15	5,49	0,99	1,96	1,42	1,72
	15	6,44	0,22	196,28	30,12	632,44	342,27	3,53	2,66	15,43	5,99	0,61	0,34	2,50	4,14
4	5	5,76	0,44	156,20	79,59	369,09	286,77	0,46	0,38	3,70	2,60	0,16	0,09	28,40	14,56
	10	5,57	0,33	130,95	55,22	408,31	324,44	0,38	0,38	3,41	3,26	0,55	0,97	25,68	10,18
	15	5,75	0,42	120,73	7,59	545,83	516,99	0,73	1,25	3,76	2,94	0,21	0,16	21,68	12,33
5	5	5,72	0,38	302,48	70,03	258,51	258,64	1,00	1,97	7,16	8,35	0,62	0,69	9,58	4,94
	10	5,80	0,46	169,62	90,37	480,92	411,29	1,08	1,54	9,48	7,98	0,55	0,65	9,20	5,01
	15	5,84	0,32	141,26	20,28	525,41	430,08	0,94	1,35	11,24	12,51	0,53	0,69	8,11	7,92
6	5	7,14	0,47	912,10	362,02	684,09	299,73	7,84	5,54	38,47	27,46	0,18	0,12	4,40	5,53
	10	6,86	0,38	737,00	213,68	691,54	318,16	3,29	1,28	35,19	18,03	0,14	0,07	6,51	11,10
	15	7,18	0,45	868,70	176,62	795,83	351,52	5,71	2,01	25,83	12,74	0,13	0,07	4,69	9,17
7	5	5,73	0,42	91,03	69,73	374,31	304,90	1,14	0,64	4,10	2,87	0,61	1,21	17,23	9,81
	10	7,22	0,54	468,02	178,54	632,22	437,77	3,00	1,16	9,26	10,74	0,35	0,80	2,86	3,30
	15	7,18	0,46	397,80	19,60	911,04	633,27	2,39	1,07	11,71	6,98	0,16	0,17	9,07	8,89
8	10	5,37	0,31	167,35	65,07	306,31	277,44	0,44	0,45	3,16	4,33	0,15	0,05	28,28	19,68
9	11	7,57	0,37	15823,93	16547,12	431,95	256,72	18,05	20,89	38,41	28,85	1,58	3,42	3,69	4,23
	15	7,06	0,25	74842,14	5414,24	430,89	276,14	3,14	2,40	180,34	455,66	5,20	11,10	7,17	6,85
	27	7,16	0,26	32508,09	14045,73	471,58	344,49	2,01	1,88	58,09	37,30	0,32	0,17	10,96	20,44
Média		6,47		5242,06		549,48		3,47		24,12		0,70		9,09	
Median		6,55		273,23		525,41		2,39		13,15		0,53		6,31	

Todas as amostras analisadas foram de água doce (salinidade $<0,1$), exceto para as três profundidades do poço 9, onde os valores de condutividade são visivelmente superiores ao restante dos poços, com valor médio de $41058 \mu\text{S}$. O poço 6, que possui valores de condutividade também maiores que os demais poços, com média de $839,27 \mu\text{S}$ e salinidade média de $0,5$. Ambos os poços se localizam na parte leste da barreira, próximo ao oceano. Os valores de condutividade variaram entre o mínimo de $91,03 \mu\text{S}$ no poço 7, e máximo de $74842,14 \mu\text{S}$, no poço 9. A temperatura não é retratada na tabela, pois seus valores são pouco variáveis tanto em relação as profundidades quanto aos nove poços da barreira, porém, os dados brutos são apresentados no Anexo 1.

Os valores de pH tiveram pouca variação entre os nove poços distribuídos pela barreira, com um mínimo de $5,37$ no poço 8, valor máximo de $7,57$ no poço 9-11m e média de $6,47$. As concentrações dos nutrientes não exibiram nenhuma relação com o pH, variando expressivamente entre os nove poços. Os teores de silicato variaram entre $250,94 \mu\text{M}$ e $920,26 \mu\text{M}$; $0,38 \mu\text{M} - 18,05 \mu\text{M}$ para fosfato; $3,16 - 180,34$ para amônio; $0,13 \mu\text{M} - 5,20 \mu\text{M}$ para nitrito; e $1,42 \mu\text{M} - 28,40 \mu\text{M}$ para nitrato. Os valores médios estão apresentados na Tabela 1. Em estudos pretéritos (WINDOM & NIENCHESKI, 2003; NIENCHESKI et al., 2007) já haviam indicado a peculiaridade do poço 9, principalmente nas profundidades de 15 e 27 metros, onde os valores médios de salinidade são de $53,8$ e $23,75$, respectivamente. Além da salinidade e condutividade, os nutrientes inorgânicos dissolvidos também possuem altas concentrações neste poço, principalmente o PO_4^{3-} ($7,73 \mu\text{M}$) e o N amoniacal ($92,28 \mu\text{M}$).

A partir da tabela geral dos dados hidroquímicos (Tabela 1), nota-se que há grande variação nos dados, porém, altos valores de desvio-padrão, que podem justificar constantes trocas de água entre os aquíferos costeiros do ambiente de estudo. Partindo da ideia de que os dados são heterogêneos, optou-se por análises estatísticas que fornecessem padrões temporais ou espaciais nos dados obtidos durante os 9 anos de amostragens.

3.1.1 Análise espacial

A fim de verificar as similaridades entre os 27 poços (9 poços em três diferentes profundidades) distribuídos na barreira e agrupar os elementos da série de dados quanto a sua variação espacial em relação aos diferentes sistemas deposicionais da formação da PCRS,

aplicou-se uma análise estatística de agrupamentos (*cluster analysis*) utilizando o método ‘Ward’ que, a partir da soma dos erros quadrados, os *clusters* que apresentam mínima perda de informação são selecionados para o agrupamento (WARD, 1963). Também foi aplicado uma análise de variância (ANOVA) com o objetivo de verificar as diferenças na concentração dos nutrientes e condutividade elétrica referentes às três profundidades de cada um dos poços (5, 10 e 15 metros).

A figura 3 apresenta como exemplo o transecto norte, no qual não houve variação na concentração dos nutrientes e da condutividade elétrica em relação as 3 profundidades dos poços dado pela análise de variância. A mesma avaliação foi feita para o transecto central, sendo bastante semelhantes que o norte, por isso não é retratado. No transecto sul, devido as inerentes características do poço 9, já discutido por outros autores (WINDOW & NIENCHESKI, 2003; NIENCHESKI et al., 2007), e o poço 8 ter apenas uma profundidade, este tipo de análise foi descartada. Em seguida, visto esses resultados, para o teste de agrupamentos foram utilizadas as médias dos nutrientes em cada um dos poços e em cada um dos transectos (norte, central e sul), pois assim, as análises abrangem todo o cordão arenoso e os diferentes sistemas deposicionais da formação da planície costeira do Rio Grande do Sul (PCRS).

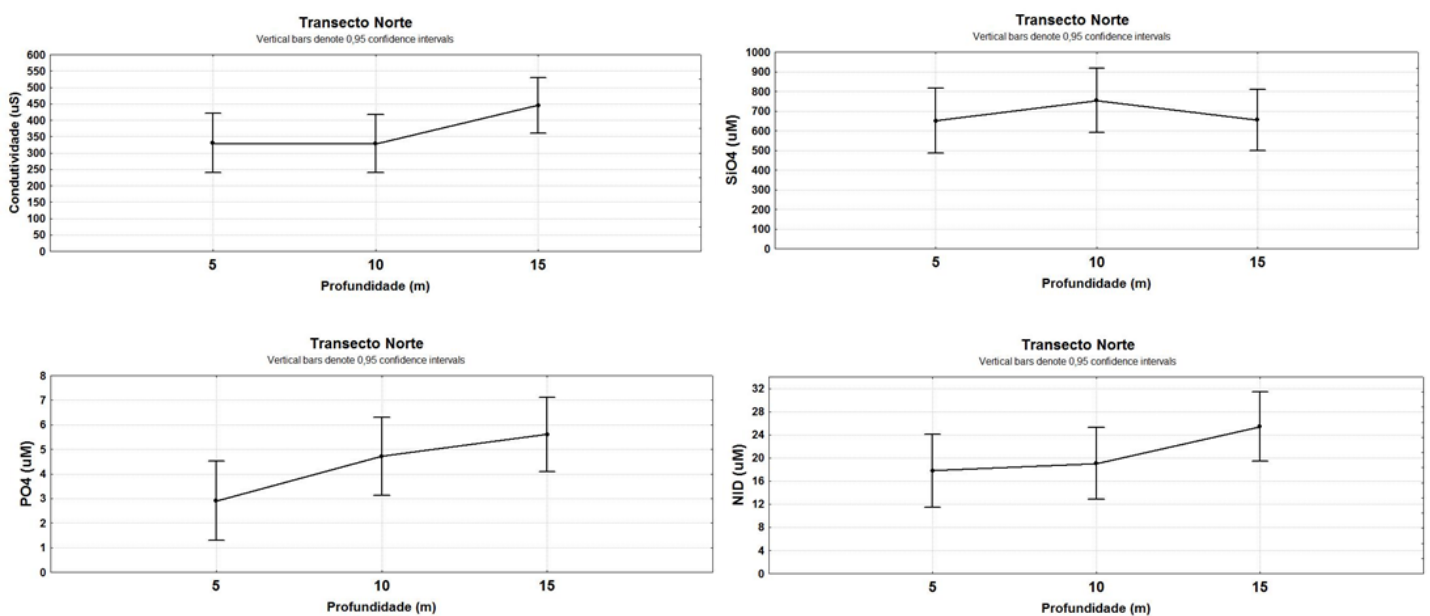


Figura 3: Análise de variância em relação as três profundidades (5, 10 e 15 metros) dos 3 poços do transecto norte para condutividade (µS) e nutrientes inorgânicos dissolvidos (µM).

Com base nos agrupamentos formados, demonstrado na Figura 4, é perceptível a diferença do poço 9 e suas cotas em relação aos demais. Outro grupo é formado com os poços 1 (próximo a Lagoa dos Patos) e 6 (adjacente ao oceano). Por último, um grupo maior é composto pelo restante dos poços da barreira (2, 3, 4, 5, 7, 8). Através da análise observa-se que os diferentes aquíferos presentes no cordão arenoso não possuem nenhum padrão em relação as distintas barreiras deposicionais da área de estudo, uma vez que os poços estão dispostos no subsistema lagunar, poços 1,4 e 7 (mais próximos a Lagoa dos Patos); sistema laguna-barreira III, poços intermediários (2, 5 e 8); e sistema laguna-barreira IV, poços 3, 6 e 9, contíguos ao oceano (Figura 2).

Foi efetuada, também, uma análise de componentes principais (ACP) com o mesmo conjunto de poços utilizado na análise de agrupamentos, permitindo identificar padrões nos dados e expressá-los de forma que suas semelhanças e diferenças sejam destacadas (HAIR et al., 1998) (Figura 4). O modo Q desta análise evidencia que apenas o poço 9 é consideravelmente um sistema de aquíferos diferenciado, onde nas três profundidades amostradas, este poço fica afastado dos demais. Portanto, a qualidade hidroquímica dos aquíferos parece não se diferenciar conforme as barreiras, onde poços de diferentes sistemas deposicionais apresentam pelo menos algum tipo de similaridade.

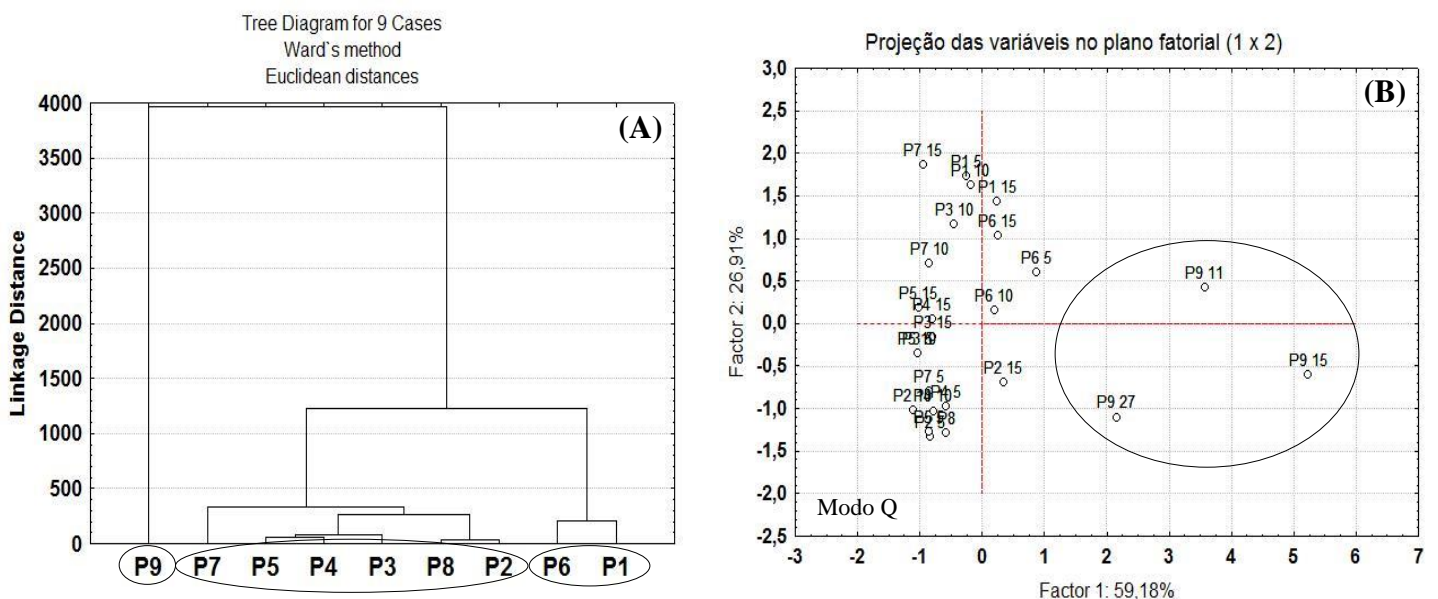


Figura 4: Análises multivariadas em relação a variação espacial dos dados de nutrientes nos 9 poços da barreira. (A) Análise de agrupamentos; e (B) Plano fatorial da PCA, modo Q.

As análises estatísticas multivariadas não mostraram qualquer tendência espacial nos dados de nutrientes, tanto vertical como longitudinalmente. Esta tendência dos dados sugere que estes sistemas geológicos são iguais em termos de composição mineral ou orgânica, ou que estes sistemas podem estar em comunicação. Além disso, os processos de formação da PCRS podem ter causado o aprisionamento do poço 9, determinando uma assinatura química diferenciada em comparação com os demais aquíferos da barreira.

Em dados ainda não publicados (STRIEDER et al., 2015), os autores fizeram uso de GPR e imagens aéreas de alta resolução apresentando discussões sobre a influência da tectônica gravitacional na evolução geológica da porção sul da PCRS. Os resultados preliminares mostraram que esta região apresenta falhas decorrentes dos processos de formação deste ambiente costeiro, como a presença de paleocanais, o que também pode atestar os processos de troca dos elementos dissolvidos entre os aquíferos e suas profundidades. Corroborando com esses resultados, Von-Ahn et al. (2014) encontraram valores de condutividade hidráulica (Kh) bastante variáveis para os poços da barreira. Devido a condutividade hidráulica ser controlada, basicamente, a partir das características de permeabilidade do meio (LOUSADA, 2005; GASPAR, 2006), dá-se a ideia de que a alta variabilidade nos valores de Kh pode estar associada com a diferenças sedimentológicas da herança geológica da PCRS (PEREIRA, 2005) e que os sistemas de fluxos locais podem ser sobrepostos uns aos outros, em um sistema de aquíferos de distintas geomorfologias (TÓTH, 1963). Isto explica, em parte, que os diferentes aquíferos presentes no cordão arenoso fazem parte de um sistema dinâmico, no qual está total ou parcialmente interligado, com água fluindo por todo o sistema, equilibrando as concentrações dos nutrientes.

Dado as inerentes características da zona costeira do Estado do Rio Grande do Sul, não só pela presença da Lagoa dos Patos, principal corpo hídrico do Estado e maior laguna do país, mas também pela sedimentologia da barreira apresentar alta permeabilidade (NIENCHESKI & JAHNKE, 2002), os aquíferos costeiros neste ambiente comportam-se como um sistema aberto, que conseqüentemente, sofre influência da lagoa, do mar, da precipitação e indiretamente, do regime de ventos. Então, a estabilidade espacial frente ao período de dados de nutrientes pode estar relacionada com as características individuais de cada sistema de aquíferos e com a possibilidade de interação entre eles e suas fontes de recarga.

3.1.2 Análise temporal

Para proceder a análise temporal da série de dados de nutrientes, efetuou-se a média por ano de cada um deles (SiO_4^{4-} ; PO_4^{3-} e NID), e a média entre as três diferentes profundidades (5, 10 e 15 metros), visto que não houve diferença significativa no comportamento dos nutrientes entre as barreiras deposicionais e as cotas de cada poço, discutido na análise espacial, item 3.1.1. Desse modo, para verificar se existe diferença significativa entre as médias anuais dos nutrientes ao longo da série temporal, os dados normalizados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA, 95% de confiança) em relação aos 24 poços distribuídos na barreira (8 poços em três profundidades, exceto o poço 9 devido suas intrínsecas características) (Figura 5). Optou-se por uma avaliação geral devido a maior abrangência de dados ($> n$ amostral) e, conseqüentemente, maior confiança para a análise de variância.

A ANOVA identificou que estes aquíferos, em termos de nutrientes, são relativamente estáveis e sem oscilações sazonais quando conhecidos os altos valores dos desvios-padrão. Sobretudo, observa-se que a concentração dos nutrientes, de uma forma geral, sofre alguma variação conforme o período amostrado. No caso do SiO_4^{4-} , por exemplo, há uma tendência de queda nas suas concentrações (2004 – 2012), com pico de alta concentração no ano de 2009. Idem para o PO_4^{3-} que tem uma diminuição em suas concentrações de 2004 a 2010, aumentando nos anos seguintes. Já para o NID, seus teores mantêm-se praticamente constantes, com picos de alta concentração nos anos de 2004 e 2007 (Figura 5).

Como a qualidade química dos aquíferos é controlada, geralmente, por fatores como a qualidade da água de recarga, o tipo de aquífero e suas características geológicas, além do tempo de residência das águas subterrâneas (RIBEIRO et al., 2007), buscou-se relacionar fatores físicos (hidrológicos) que podem modificar a hidrodinâmica e as características químicas dos aquíferos costeiros da região de estudo. Logo, foi utilizado dados de precipitação bruta e acumulada (estação meteorológica da FURG), e dados de nível da Lagoa dos Patos (Agência Nacional das Águas – ANA) para a mesma série temporal dos parâmetros químicos (nutrientes) (Figura 6). Dá-se a hipótese de que, a Lagoa dos Patos, por representar um importante corpo hídrico na região de estudo, tanto em extensão quanto em volume, pode ter forte relação com as flutuações dos nutrientes na água subterrânea, uma vez que representa a principal fonte de

recarga dos aquíferos nesta região (MACHADO et al., 2006). E, a precipitação, além de fonte de recarga direta, tem importância na recarga de toda a bacia de drenagem da lagoa.

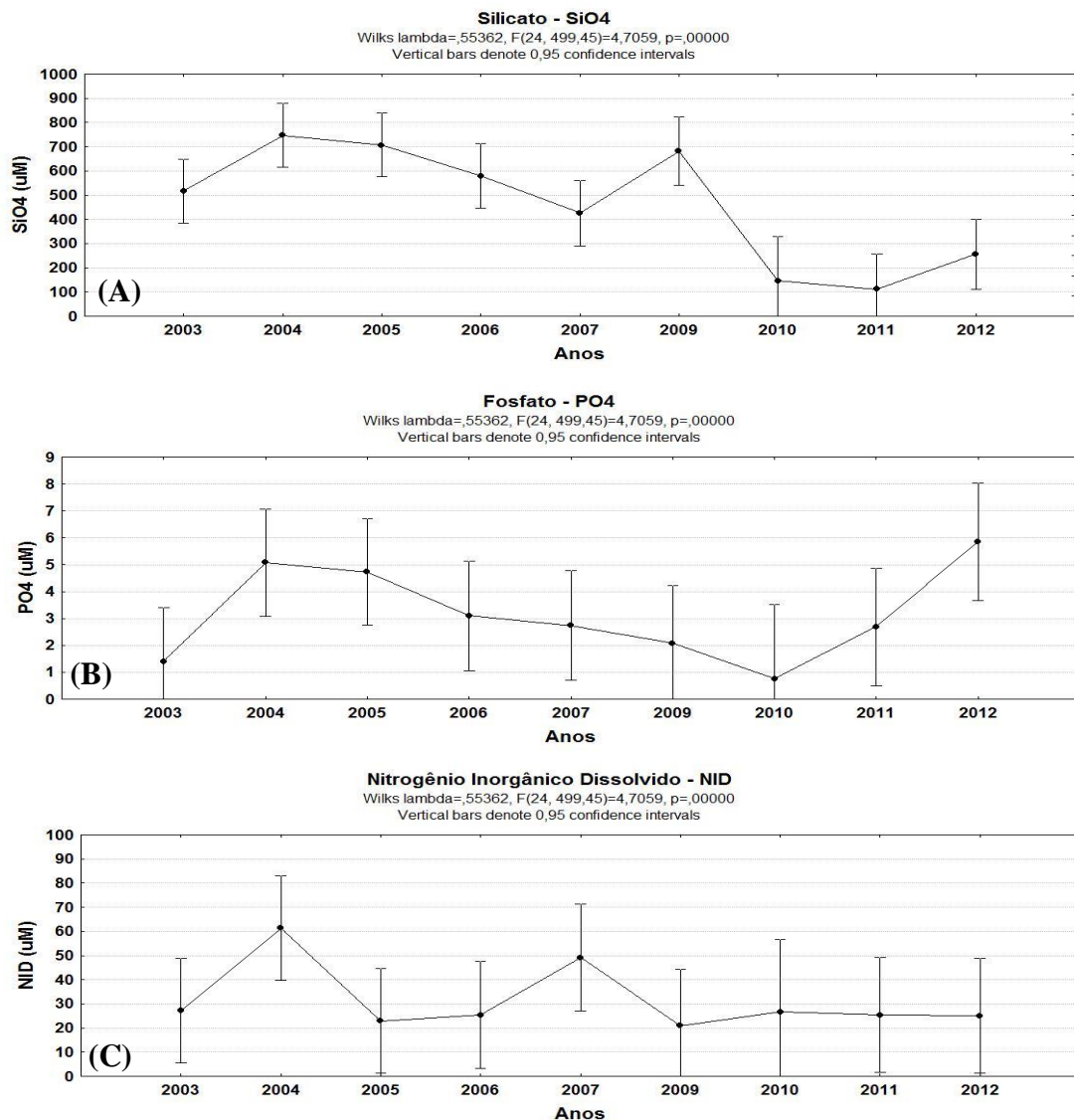


Figura 5: Análise de variância dos dados de nutrientes em relação a série amostral dos 9 anos. (A) Silicato (SiO₄); (B) Fosfato (PO₄³⁻); (C) Nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) em micro-molar (µM).

De forma geral, o nível da Lagoa dos Patos sofre pouca variação entre os anos, como constatado através da linha de tendência (Figura 6). Porém, com base na série temporal é perceptível a presença de picos de altos e baixos níveis da lagoa, o que pode ser referente aos períodos de cheia e seca, ou de altos e baixos índices de precipitação, consecutivamente. Em

relação a série de precipitação, este parâmetro é bastante variável no tempo e no espaço, sendo uma variável de difícil manuseio pela sua grande variabilidade (COLLISCHONN, 2006).

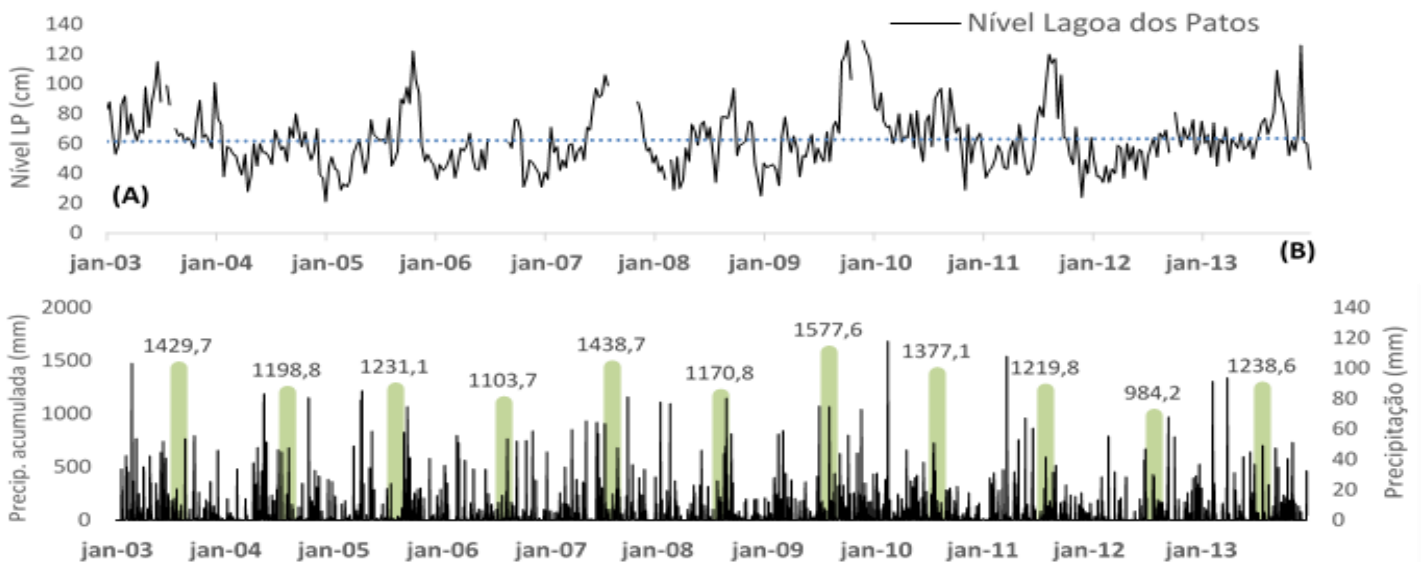


Figura 6: Série temporal dos dados de nível da Lagoa dos Patos (cm) (A); e precipitação bruta e acumulada anual (mm) (B), em relação aos 9 anos de dados.

A Figura 7 mostra a relação entre o nível da Lagoa dos Patos (LP) com a concentração dos nutrientes dissolvidos frente a série amostral. Foram utilizados os dados anuais médios de nível e a média da concentração dos nutrientes obtidos a partir da análise de variância. Como citado anteriormente, optou-se pelas médias entre os anos, sem qualquer relação com a sazonalidade uma vez que, em análises prévias, não houve diferenças significativas entre as estações do ano. Posteriormente, aplicou-se uma análise de correlação para avaliar a intensidade de associação entre as variáveis físicas (chuva, nível) e químicas (nutrientes dissolvidos) (Tabela 3).

Observa-se que a variável 'Nível LP' possui correlação negativa com ambos os nutrientes inorgânicos. Destaque para o PO_4^{3-} , onde a correlação é forte (-0,74), indicando que essas duas variáveis estão negativamente correlacionadas, ou seja, quando de menor nível da Lagoa dos Patos, maior a concentração dos nutrientes, principalmente em relação ao fosfato. Outro fator importante é a alta correlação positiva entre o nível da LP e a precipitação anual acumulada (0,85), mostrando que essas variáveis são diretamente proporcionais.

Consequentemente, a precipitação apresentou forte correlação negativa também com o PO_4^{3-} , porém, baixa correlação positiva com o SiO_4^{4-} e NID.

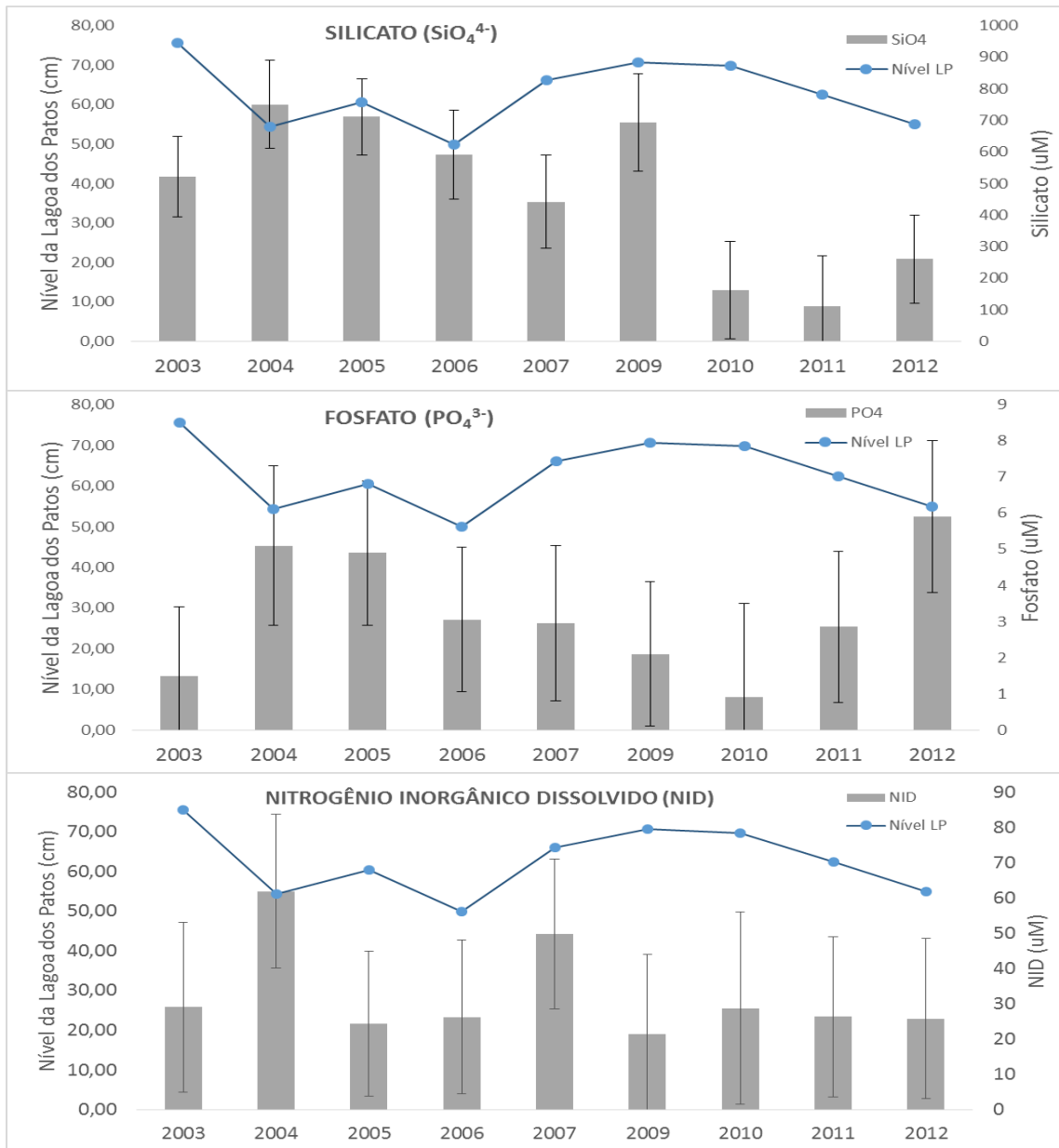


Figura 7: Concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos (SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} e NID - μM) e nível da Lagoa dos Patos (cm) referentes a série temporal nos 9 anos de dados.

O fato da concentração dos nutrientes ser inversamente proporcional ao nível da LP concerne a ideia de que quando o nível de água aumenta, ocorre diluição dos nutrientes na água subterrânea já que a LP representa uma das principais fontes de recarga dos aquíferos

adjacentes. Sendo um corpo hídrico superficial na região marginal da barreira, as águas superficiais podem ter relação direta com os aquíferos através dos sedimentos permeáveis, no qual suas interações são dependentes do gradiente hidráulico que tem grande influência no grau de penetração da água (ANDRADE et al., 2008). Nesse caso, uma maior coluna de água em períodos onde ocorrem os maiores níveis, confere maior carga hidráulica e, portanto, maior poder de penetração das águas.

É conhecido que, em geral, nas águas subterrâneas a concentração dos nutrientes é mais elevada que nas águas superficiais (WINDOM et al., 2006; LEE et al., 2011; SANTOS & EYRE, 2011). Os teores de nitrogênio e fósforo, por exemplo, são bastante variáveis e dependem das fontes de recarga, tipo de aquífero, bem como sua permeabilidade, e as condições climáticas regionais (SLOMP & VAN CAPPELLEN, 2004). Os aportes naturais envolvem a lixiviação de N e liberação do P a partir da matéria orgânica do solo e dessorção de P de óxidos/hidróxidos de Fe sob condições de anoxia, além do intemperismo das fases minerais (CARLYLE & HILL, 2001; SLOMP & VAN CAPPELLEN, 2004). Em períodos onde ocorre maior nível da LP, as águas superficiais podem ter maior contato com a água subterrânea e, dessa forma, influenciar na concentração dos nutrientes no ambiente subterrâneo diluindo os teores dos nutrientes.

No caso específico do PO_4^{3-} , em virtude do alto valor de correlação entre este nutriente e as variáveis 'nível' e 'precipitação', a relação entre esses parâmetros é mais eminente. A disponibilidade de fósforo inorgânico na água ocorre em função dos processos físico-químicos de adsorção e dessorção que controlam as transformações de P particulado em P dissolvido e vice-versa (PANT & REDDY, 2001; KOSKI-VÄHÄLÄ & HARTIKAINEN, 2001). A adsorção depende de fatores químicos, como a mineralogia, e físicos, como o tamanho e o enriquecimento das partículas. Já a dessorção envolve as condições geoquímicas do ambiente bem como o pH e o potencial de oxi-redução, o consumo a partir dos microrganismos, entre outros (SHARPLEY et al., 1992; CORRELL, 1998; KOSKI-VÄHÄLÄ & HARTIKAINEN, 2001).

Tabela 2: Matriz de correlação entre os dados de nível da Lagoa dos Patos (LP), precipitação acumulada e nutrientes inorgânicos dissolvidos, com médias e desvio-padrão referentes a série amostral de 9 anos.

	Média	Desvio-Padrão	Nível LP	Precipitação	SiO ₄ ⁴⁻	PO ₄ ³⁻	NID
Nível LP	62,7	8,58	1	0,85	-0,16	-0,74	-0,21
Precipitação	1284,5	185,94		1	0,19	-0,72	0,005
SiO ₄ ⁴⁻	468,89	241,68			1	0,26	0,28
PO ₄ ³⁻	3,25	1,70				1	0,26
NID	32,11	13,51					1

O fato das concentrações de PO₄³⁻ serem maiores em períodos de menor nível da Lagoa dos Patos, além de ter relação com o processo de diluição, onde a água superficial menos concentrada entra em contato com a água subterrânea de maior concentração, tem ligação com as interações químicas, físicas e geológicas dos aquíferos. O fósforo encontra-se na natureza, essencialmente, na forma de fosfato, no qual os oxigênios exibem alta reatividade com os grupos funcionais dos solos, como os argilominerais, óxidos/hidróxidos de ferro, alumínio e silício. Esta forte afinidade tende a reter o PO₄³⁻ no sistema, tornando menos disponível para lixiviação, característica de ânions com baixa mobilidade no perfil do solo (PELLEGRINI, 2005; SPITERI et al., 2006; ZOZ et al., 2009). Dessa forma, em períodos de maior precipitação e nível da lagoa, maior será a conexão da água superficial com as águas subterrâneas e, portanto, os aquíferos ficam mais sujeitos ao processo de intemperismo e oxigenação de suas águas. Tais características impõe elevada capacidade de adsorção do fosfato e sua magnitude é influenciada pela natureza e quantidade dos sítios de adsorção que variam de acordo com as características do solo (BAHIA FILHO, et al., 1983).

Windom et al. (2006), em estudo onde avaliou a importância da descarga de água subterrânea (SGD) como fonte de ferro dissolvido para o oceano Atlântico Sul, encontraram valores significativos deste micronutriente relacionado com o estuário subterrâneo e sua potencial contribuição para a zona de surfe, que pode ter grande influência na produtividade primária local. Essas altas concentrações de ferro associadas ao sistema de aquíferos costeiros da barreira pode ter relação na retenção do PO₄³⁻ devido ao processo de adsorção citado anteriormente, o que faz do fosfato um nutriente com forte dependência hidrogeoquímica do

ambiente em questão. Já o nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), como pode ser observado na análise de variância (Figura 5), suas concentrações são mais constantes temporalmente.

3.1.3 Os aquíferos e seus aspectos regionais

O fato do ambiente de estudo ser constituído por um complexo conjunto de ambientes deposicionais e parecer ser muito dinâmico, principalmente em relação as lagoas costeiras e corpos de águas superficiais, foi realizado uma análise de correlação entre os dados de nutrientes para verificação do grau de relação entre as variáveis. Encontrou-se alta correlação positiva entre a condutividade, PO_4^{3-} ($r = 0,6$) e NID (0,88), enquanto que o SiO_4 , apresentou baixa correlação com os demais parâmetros.

Dado a alta correlação entre condutividade, NID e PO_4^{3-} , foi plotado um gráfico de dispersão para cada um dos transectos da barreira, avaliando os poços em diferentes regiões, aqueles próximos a lagoa e próximos ao mar, além de parte norte, central da barreira (Figura 8). Os diagramas de dispersão mostram uma relação de causa entre as variáveis e exibiu o primeiro indício de que há distinções nas concentrações dos nutrientes inorgânicos dissolvidos e condutividade em relação ao local em que os poços estão distribuídos.

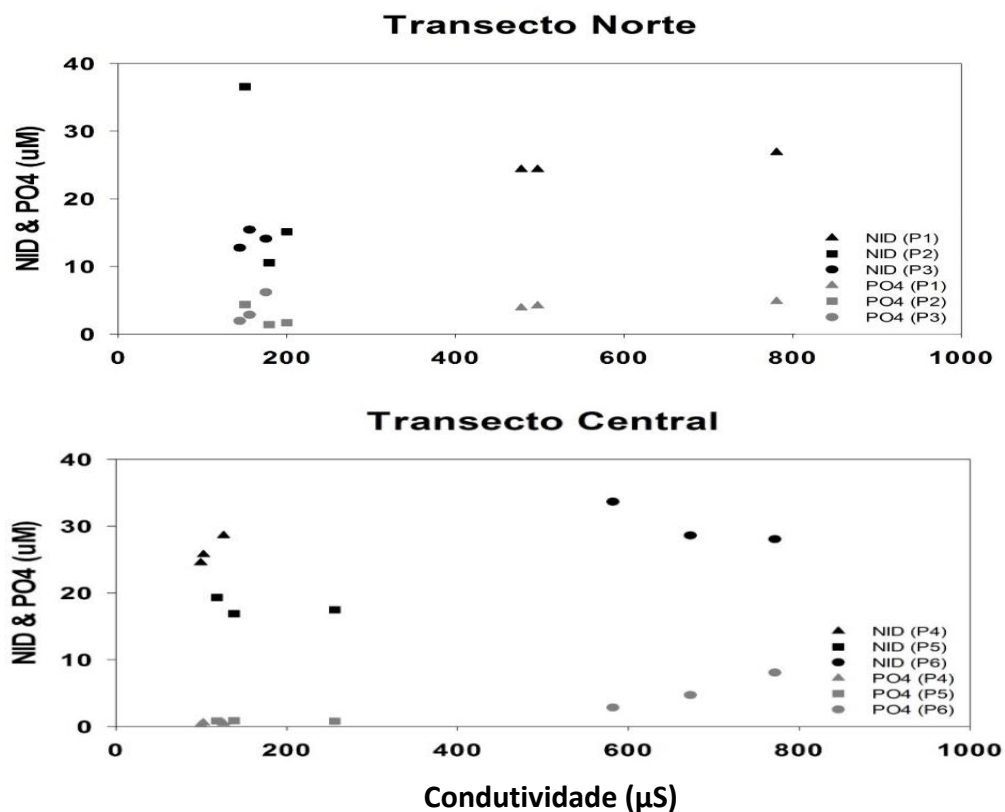


Figura 8: Gráfico de dispersão entre PO_4^{3-} e NID x Condutividade nos transectos norte e central nas três diferentes profundidades de cada um dos poços.

No transecto norte, os poços 1 e 2 claramente possuem características semelhantes em relação a concentração de NID, enquanto que o poço 3, valores expressivamente maiores tanto de NID, quanto de condutividade. Tal fato é observado nas três profundidades de cada poço e pode estar relacionado com a proximidade deste poço com um grande sangradouro nesta região. No transecto central, o gradiente de concentração do NID e da condutividade são opostos ao do transecto norte. Os poços 4 e 5 parecem ter o mesmo comportamento, enquanto que o poço 6, mais próximo do mar, os mais altos valores de NID e condutividade. Este mesmo padrão também é observado em relação a condutividade e os outros parâmetros (PO_4^{3-} e SiO_4).

Estudos sobre os corpos de água intermitentes (sangradores) presentes na região costeira do Estado do Rio Grande do Sul (FIGUEIREDO, 2005; FIGUEIREDO & CALLIARI, 2006), documentaram a distribuição, ocorrência e características destes canais de escoamento de água do continente para o oceano, diferenciando-os a partir da sua distribuição, abastecimento de água e comportamento sazonal. Assim, os sangradores podem ser classificados como permanente, intermitentes (sazonais) e efêmeros. No transecto norte, localizado na região do município de Mostardas-RS, o poço 3 está situado ao lado de um sangradouro bem definido, associado a Lagoa da Figueira, que possibilita uma descarga hídrica intermitente da região do pós-dunas para a zona de surf, e que pode ser intensificada em períodos de alta pluviosidade. As características hidrogeológicas da planície costeira do Estado, como o baixo relevo e a presença das inúmeras lagoas costeiras próximo à costa, propiciam a formação destes corpos d'água na região de estudo (SERPA, 2013).

O fato de ter-se um sangradouro bem estabelecido na região do poço 3 pode explicar as mais baixas concentrações dos nutrientes dissolvidos e da condutividade nesse poço. A presença do sangradouro pode causar forte influência da água doce que flui pelos sedimentos permeáveis da barreira para o oceano, com alta penetração da água nos sedimentos devido a saturação de água na superfície. Abrangendo uma área significativamente grande, o sangradouro pode estar diluindo os elementos dissolvidos na água subterrânea. Neste caso, a influência da água salgada que penetra nos sedimentos continentais é minoritária comparado com a água doce do continente e então, a formação do estuário subterrâneo pode estar ocorrendo mais próximo ao oceano.

De acordo com Evangelista (1989), os aquíferos costeiros descarregam água doce ao oceano estabelecendo um certo estado de equilíbrio entre o fluxo de água doce e de água salgada. Sobre condições normais, os aquíferos sofrem modificações em seus fluxos apenas a longo prazo, geralmente por mudanças climáticas ou movimentos relativos a terra ou o mar. Porém, quando as condições naturais são alteradas, como por exemplo, pelo aumento do fluxo de água doce devido períodos de alta precipitação ou, no caso do ambiente de estudo, quando há cursos de águas superficiais, este equilíbrio água doce-salgada pode movimentar-se em um sentido ou outro. Winter et al. (1998) atenta ao fato de que existe grande interação entre corpos hídricos superficiais e as águas subterrâneas dependendo das características fisiográficas e climáticas da região. As condições de fluxo podem ser do tipo efluente, influente e efluente/influente (Figura 9), no qual, em regiões planas extensas, como no ambiente de estudo, o tipo de fluxo é predominantemente influente, aquele em que as águas superficiais contribuem para o fluxo subterrâneo.

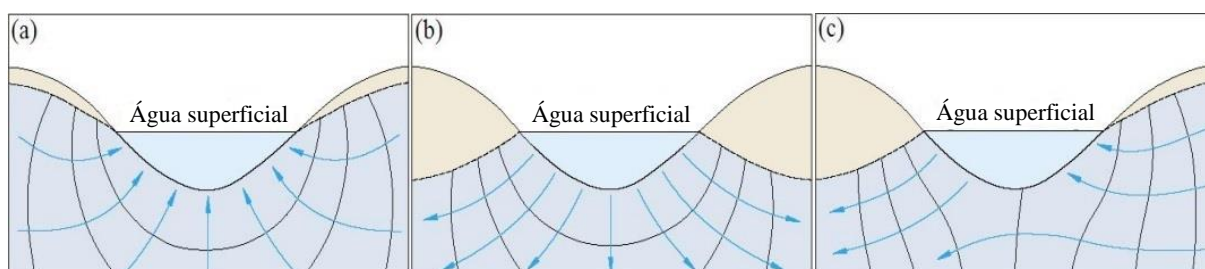


Figura 9: Condições de fluxos em lagos/banhados: (a) efluente; (b) influente; e (c) efluente/influente. Adaptado de Winter et al. (1998).

No transecto central é observado o oposto. No poço 6, mais próximo ao mar, as maiores concentrações dos nutrientes, comparado com os demais poços desse transecto, podem estar relacionadas com uma maior penetração de água salgada nos sedimentos da barreira. Como nesta região não tem influência de corpos de águas superficiais, a zona de mistura entre água doce e salgada deve ocorrer mais para o interior do continente onde os processos químicos de adição, remoção ou alteração da concentração de compostos dissolvidos no sistema acontecem.

3.1.4 Elementos maiores

3.1.4.1 Diagrama de Piper

Para melhor caracterização dos aquíferos costeiros, dada a complexidade do ambiente e suas interações com as águas superficiais (continental e marinha), foi utilizado o diagrama de Piper (PIPER, 1994) (Figura 10, Tabela 4). Esta metodologia classifica e compara os diferentes grupos de águas subterrâneas a partir das proporções entre os principais cátions (Ca^{2+} , Mg^{+2} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) e ânions (HCO_3^- , Cl^- e SO_4^-) em dois diagramas triangulares respectivos. As águas são classificadas de acordo com a combinação das proporções relativas dos íons. A determinação dos elementos maiores foi feita em quase todos os poços distribuídos pela barreira, exceto para o poço 9, por ter alta salinidade e poço 6, pela falta de amostras.

Ao todo foram analisadas 14 amostras (Outubro 2014), no qual 6 classificadas como água ‘sódica cloretada’ (42,8%); 5 classificadas como água ‘sódica bicarbonatada’ (35,7%); 2 como água ‘mista bicarbonatada’ (14,3%); e 1 como ‘cálcica bicarbonatada’ (7,1%). A partir do diagrama é perceptível a influência do íon sódio nas águas dos aquíferos. Em onze amostras, este cátion está presente como principal íon na composição das águas subterrâneas.

Tabela 3: Concentração dos elementos maiores (cátions e ânions) nos poços da barreira dado a classificação das águas subterrâneas.

	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	$\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$	SO_4^{2-}	Classificação das águas
P1_10	80,12	34,45	7,82	50,53	159,78	1,95	Sódica bicarbonatada
P1_15	128,85	30,13	7,99	117,45	164,22	16,77	Sódica bicarbonatada
P2_10	25,95	12,82	5,86	31,62	86,41	6,71	Mista bicarbonatada
P2_15	43,32	12,84	8,33	50,08	94,69	6,10	Sódica bicarbonatada
P3_5	56,71	16,18	9,92	114,75	84,37	7,45	Sódica cloretada
P3_10	111,16	7,54	12,86	192,40	72,47	29,37	Sódica cloretada
P3_15	160,35	7,22	20,44	385,28	74,44	86,43	Sódica cloretada
P4_5	10,61	7,88	3,04	9,21	64,10	5,47	Mista bicarbonatada
P4_10	19,35	10,10	2,30	18,63	69,92	7,59	Sódica bicarbonatada
P4_15	23,71	9,28	2,50	23,20	86,60	5,13	Sódica bicarbonatada
P5_10	72,83	11,78	10,39	141,33	67,31	15,35	Sódica cloretada
P5_15	68,34	6,25	8,14	99,90	70,24	18,84	Sódica cloretada
P7_15	36,69	41,58	6,30	32,83	138,06	14,79	Cálcica bicarbonatada
P8_10	33,30	4,28	6,88	46,24	0,00	12,52	Sódica cloretada

Mirlean et al. (2005) em estudo da composição química das águas subterrâneas da planície costeira sul do Brasil atribui as características pedológicas, como a composição quartzo-arenosa e a carência em cátions alcalinos-terrosos (Ca^{2+} e Mg^{2+}) dos solos, além das condições climáticas da região como favoráveis na formação de águas subterrâneas doces, e predominância de sódio e cloreto como íons principais. Segundo Evangelista (1989), quando se faz referência aos principais cátions em águas subterrâneas, o íon sódio é dominante de aquíferos costeiros com influência de salinização e que está intimamente relacionado com processos de trocas iônicas, principalmente com o Ca^{2+} .

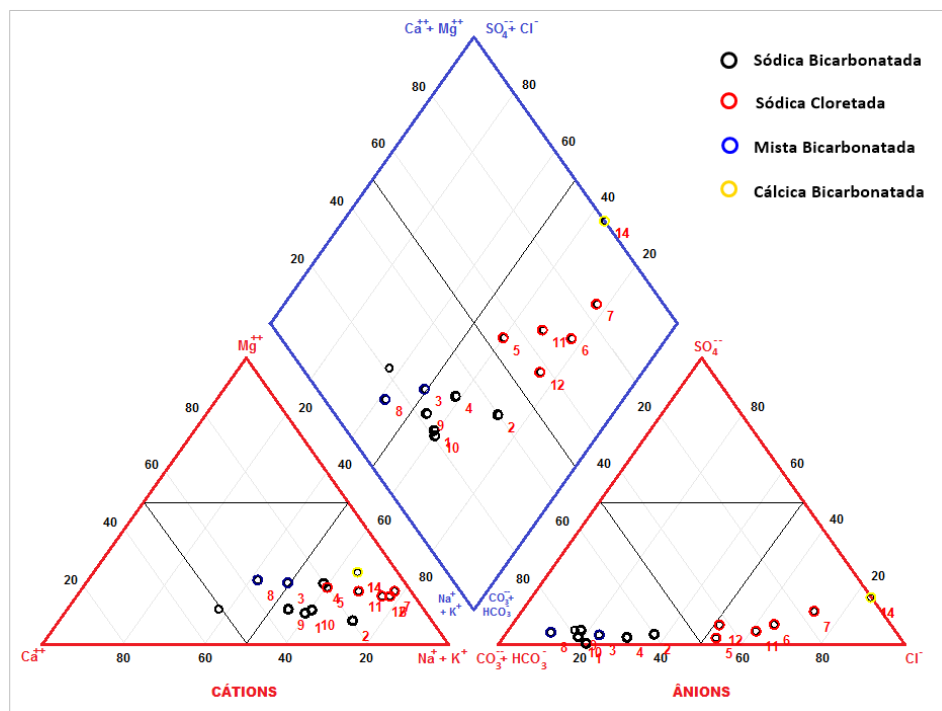


Figura 10: Diagrama de Piper para classificação das águas subterrâneas dos poços da barreira a partir das proporções entre principais cátions e ânions.

O diagrama ainda mostra que a maioria das amostras (6) foram classificadas como sódica cloretada. Os poços que apresentaram esta classificação foram o 3, 5 e 8. De acordo com Lima (2014), o íon cloreto é considerado um dos maiores responsáveis pela salinização das águas e está presente em praticamente todas as águas naturais. Por ser um íon estável e muito solúvel, o Cl^- pode aportar em águas naturais de diversas formas, seja através da dissolução de

seus sais presentes no solo, bem como pela intrusão de água marinha em aquíferos como resultado de um desequilíbrio da pressão hidrostática (HEM, 1985). Portanto, apesar das amostras sódicas cloretadas não terem valores de salinidade, a influência da água marinha no sistema de aquíferos da área de estudo é evidente, principalmente nos transectos central e sul, uma vez que o gradiente hidráulico nessas regiões da barreira é inferior a parte norte. Além disso, no transecto central não há a interferência de corpos de águas superficiais, e então, a água marinha pode ter maior poder de penetração, conferindo ao poço 5 águas cloretadas. Já no transecto norte, o único poço que teve este tipo de classificação para suas águas foi o 3, que se situa muito próximo ao oceano, onde o íon cloreto é o mais abundante de águas salgadas.

Constatando os resultados encontrados a partir da análise de elementos maiores, um estudo sobre os recursos hídricos subterrâneos do Estado do Rio Grande do Sul feito pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2005) classificou 2 diferentes sistemas de aquíferos para a região de estudo que compreende todos os aquíferos associados com os sedimentos da PCRS, desenvolvendo-se desde o Chuí até Torres. No projeto foram analisadas 1682 amostras de água subterrânea para análise de elementos maiores com interpretação utilizando o diagrama de Piper. Os autores classificaram os aquíferos em: 1) Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I, onde os ânions variaram entre bicarbonatos e cloretos sendo o cátion predominante o sódio. No entanto, as águas foram categorizadas como bicarbonatadas a cloretadas sódicas, além de eventualmente ser encontrado águas cloretadas com maior teor salino; 2) Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II, com as mesmas características do primeiro, diferenciando apenas na maior quantidade de sólidos totais dissolvidos e na porção norte, onde é comum altos teores de ferro. No entanto, além das características dos sedimentos na zona costeira do Estado, é evidente a influência da água marinha nos aquíferos costeiros da PCRS pelos altos teores de Na^+ e Cl^- , principalmente nos poços mais próximos ao oceano.

Para verificar as fontes destes elementos para o sistema de aquíferos da barreira e relacioná-las com os nutrientes inorgânicos dissolvidos, foi analisada a relação entre o somatório dos cátions e ânions de todos os poços amostrados. Nota-se que a distribuição entre estes íons tem uma correlação significativa, dado o valor de $R^2 = 0,8913$ (Figura 11 - A) e, portanto, o sistema encontra-se em um bom balanço iônico de suas águas subterrâneas. Santos et al. (2008), em estudo onde foi caracterizado a distribuição dos íons maiores na região do extremo sul da PCRS, os autores também encontraram um significativo balanço iônico nas

amostras de águas subterrâneas e águas superficiais da Lagoa Mangueira. As incertezas nas análises foram atribuídas a presença de outros íons presentes como o NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} e outros microelementos, o que pode acontecer também para a região do presente estudo devido as semelhantes características geológicas de toda a PCRS.

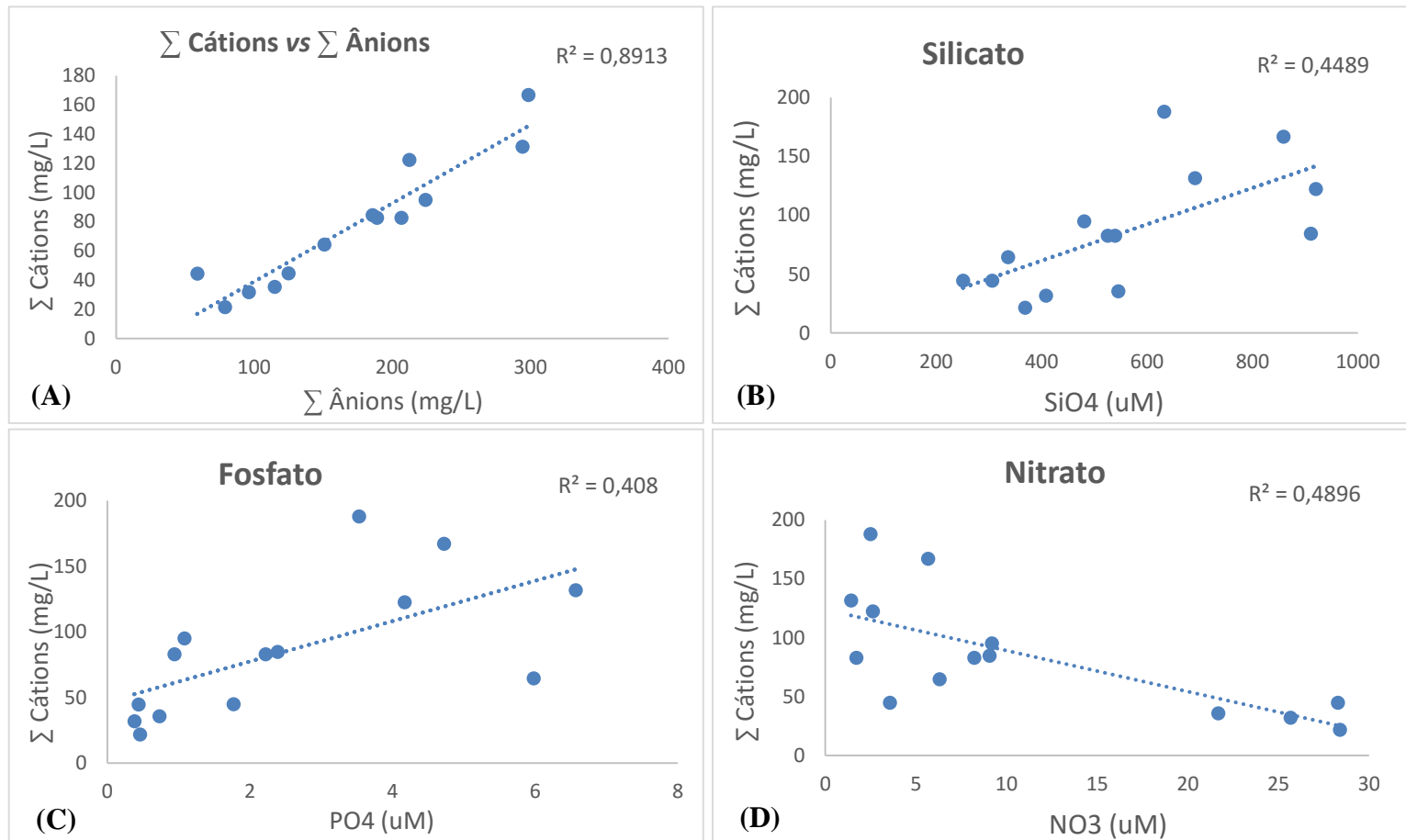


Figura 11: Correlação entre o somatório dos íons principais (cátions e ânions) (A), e sua relação com as concentrações dos nutrientes inorgânicos dissolvidos – SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} e NO_3^- (B, C e D) das águas subterrâneas dos aquíferos da barreira da Lagoa dos Patos.

Quando analisado a relação entre os cátions e os nutrientes aniônicos (SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} e NO_3^-) (Figura 11 - B, C e D), observa-se que estes parâmetros não possuem uma boa correlação, com valores de $R^2 = 0,4489$ para o silicato; 0,408 para o fosfato; e 0,4896 para o nitrato. A distribuição dispersa de ambos os dados plotados, sugere que as fontes dos nutrientes para o sistema de aquíferos costeiros da região de estudo, em grande parte, não são as mesmas que dos íons majoritários. Segundo Evangelista (1989), as concentrações dos íons nos aquíferos costeiros são dependentes da formação geológica do ambiente, bem como a interação entre a

água e o solo, e a influência da intrusão de água marinha, mais rica em íons, nos aquíferos, sempre em busca de um equilíbrio iônico. No entanto, os elementos maiores têm íntima ligação com a matriz do solo.

Já os nutrientes avaliados podem ter diversas origens, desde aquelas citadas acima que incluem a relação com as características geológica dos aquíferos, até mesmo de origem orgânica e de fontes externas, como as fontes de recarga dos mesmos. O silicato, por exemplo, está presente no ambiente aquático principalmente a partir da decomposição de minerais de silicato de alumínio, frequentes em rochas sedimentares (ESTEVEZ, 1950; MADUREIRA FILHO et al., 2000), onde sua solubilidade em águas naturais depende de fatores como temperatura, pH, o estado de combinação da sílica cristalina ou amorfa, entre outros (YARIV & CROSS, 1979).

O fosfato, assim como o silicato, também tem importante relação com os sedimentos do solo ou ligados a outros elementos, como o cálcio, ferro e alumínio (formas inorgânicas) (BENITEZ-NELSON, 2000; SONG, 2010). Em suas formas orgânicas, provém de diferentes fontes e pode ser constantemente alterado por processos de degradação na interface sedimento-água (RUTTEMBERG, 1992). O fato do silicato e do fosfato, em suas formas inorgânicas, terem grande relação com a geologia do ambiente pode explicar o comportamento semelhante na análise de variância quando avaliado a concentração dos nutrientes ao longo da série temporal (item 3.1.2). Por fim, o NO_3^- apresenta-se, em sua maioria, nas formas orgânicas, sendo uma pequena parte mineralizada (BARROS et al., 2011).

Portanto, feito a relação entre as diversas fontes dos elementos químicos nas águas subterrâneas dos aquíferos costeiros da área de estudo, além das análises estatísticas frente a série temporal e espacial dos dados, constata-se que existe diversas fontes e formas em que estes elementos podem apresentar-se no ambiente. A baixa correlação entre os nutrientes e os elementos maiores enfatiza mais uma vez que o sistema de aquíferos da barreira arenosa da LP é dinâmico e está sujeito a trocas de elementos entre os sedimentos permeáveis, com influência de corpos hídricos superficiais e os fatores do clima, que alteram os níveis dos aquíferos e, conseqüentemente, os fluxos das águas subterrâneas para a região costeira adjacente. Posto isto, surge a dúvida de qual seria a intensidade e os fluxos gerados. O capítulo a seguir foi construído para trazer as respostas a essas perguntas.

4 CONCLUSÕES

Em uma visão geral dos dados, a concentração dos nutrientes é bastante variável ao longo dos aquíferos costeiros superficiais da área de estudo quanto aos três transectos. No entanto, quando comparados em conjunto, os altos valores de desvio-padrão indicam que este sistema de aquíferos têm ampla variabilidade em termos de nutrientes, o que sugere que estejam interligados, tanto com suas fontes superficiais de recarga (LP e precipitação), ou até mesmo com outro sistema de aquífero regional mais profundo. Os períodos de alto e baixo fluxo estariam relacionados com esta variabilidade dado a diferença no gradiente hidráulico imposto pela variação do nível da LP.

As análises estatísticas descritivas e multivariadas mostraram que os aquíferos costeiros são estáveis espacialmente ao longo dos transectos e nas três diferentes profundidades de cada um dos poços, em termos de nutrientes, para o período de 9 anos de dados. As concentrações dos nutrientes das águas subterrâneas não são alteradas significativamente ao longo das distintas barreiras deposicionais da formação da PCRS. Porém, quando analisado os teores dos nutrientes em relação a sua distribuição temporal, observa-se que estes elementos são bastante variáveis no tempo, dependentes, essencialmente, das fontes de recarga dos aquíferos costeiros, bem como a variação do nível da Lagoa dos Patos e os índices de precipitação pluviométrica.

Analisando os aquíferos da barreira e seus aspectos regionais, observou-se que as maiores diferenças nos teores dos nutrientes inorgânicos dissolvidos estão essencialmente relacionadas com as características intrínsecas de cada sistema de aquíferos. A presença de corpos hídricos superficiais (LP e sangradouros) demonstrou alterar a concentração e disponibilidade dos nutrientes nas águas subterrâneas. Além disso, os aquíferos localizados mais próximos da região de praia, local onde ocorre o encontro entre água continental e marinha, estão mais sujeitos aos processos de troca e aporte desses nutrientes.

As análises de classificação das águas quanto a predominância dos íons maiores mostrou que existe grande influência da água marinha nos aquíferos da área de estudo pelos altos teores de Na^+ e Cl^- , principalmente nos poços mais próximos ao oceano, o que também acontece devido as características do solo da região. Quando avaliado a correlação entre os principais íons e as concentrações dos nutrientes nos poços da barreira, constatou-se que os nutrientes

dissolvidos provêm de fontes distintas à dos elementos maiores, corroborando com a forte influência dos agentes de recarga dos aquíferos na assinatura química das águas subterrâneas nesta região.

5 REFERÊNCIAS

BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A. C. 1983. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do Planalto Central. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 7, 221-226.

BARBOZA, E. G., TOMAZELLI, L. J., DILLENBURG, S. R., ROSA, M. L. C. C. 2009. Planície costeira do Rio Grande do Sul, erosão em longo período. *Sociedad Uruguaya de Geología*, n. 15, 94 – 97.

BARROS, J. D.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; PEREIRA, W. E. 2011. Effects of different soil management systems in the chemical properties in the coastal plains of States Paraíba. *Iranica Journal of Energy & Environment*, p.339 – 347.

BAUMGARTEN, M. G. Z., WALLNER-KERSANACH, M., NIENCHESKI, L. F. H. *Manual de análises em oceanografia química*. 2ª ed. Rio Grande: Editora Furg, 2010. 172p.

BENITEZ-NELSON, C. R. 2000. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems. *Earth Science*, 51, 109–135. doi:10.1016/S0012-8252(00)00018-0.

BRAGA, B. et al. 2005. *Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

CALLIARI, L. J. *Aspectos sedimentológicos e ambientais na região estuarina da Lagoa dos Patos*. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

CASTELÃO, R. M. & MÖLLER JR. O. O. 2003. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na lagoa dos Patos. *Atlântica*, Rio Grande, v. 25 (2), 91-106.

CASTELLO, J. P. & MÖLLER JR. O. O. 1977. Sobre as condições oceanográficas no Rio Grande do Sul. *Atlântica*. v. 2(2), 25-35.

CHARETTE, M. A., DULAIIOVA, H., GOMMEEA, M. E., HENDERSON, P. B., MOORE, W. S., SHOLTEN, J. C., PHAM, M. K. 2012. GEOTRACES radium isotopes interlaboratory comparison experiment. *Limnol. Oceanogr.* v. 10, 451–463.

COLLISCHONN, B. Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre. RS. 2006. 131p.

CORRELL, D. L. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 27, 261-266.

- DARCY, H.; LES FONTAINES. *Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris, 1856.
- DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, R. C. 1998. Relationship between precipitation anomalies in Uruguay and Southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate*, Boston, v.11, 251-271.
- DILLENBURG, S. R.; ROY, P. S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L. J. 2002. Influence of Antecedent Topography on Coastal Evolution as Tested by the Shoreface Translation–Barrier Model (STM). *J.Coast.Res.* v. 16, 71–81.
- ESTEVES, F. A. 1950. Fundamentos de limnologia. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- EVANGELISTA, I. M. 1989. *Salinización por intrusión marina. Aspectos teóricos y metodológicos. Aplicación a los acuí-feros costeros de la provincia de Castellón*. Diputación de Castellón. 211 p. Castellón.
- FIGUEIREDO, S. A. & CALLIARI, L. J. 2006. Washouts in the central and northern littoral of Rio Grande do Sul State, Brazil: distribution and implication. *Journal of Coastal Research*, SI 39: pp. 366-370.
- FIGUEIREDO, S.A. & CALLIARI, L.J. 2005. Sangradouro: Distribuição Espacial, Variação Sazonal, Padrões Morfológicos e Implicações no Gerenciamento Costeiro. *Pesquisas*, Porto Alegre, Gravel, n. 3, pp. 47-57.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. 1997. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 5 (1), 127-132.
- GARCÉS, E.; BASTERRETXEA, G.; TOVAR-SÁNCHEZ, A. 2011. Changes in microbial communities in response to submarine groundwater input. *Mar. Ecol.Prog. Ser.* v. 438, 47–58.
- GASPAR, M. T. G. *Sistema aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão*. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Brasília, 2006. 158p.
- GGWEATHER. El Niño and La Niña years and intensities. Disponível em:< <http://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acesso em 14 de Jul. 2015.
- GRIMM, A.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. 1998. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*. Boston, v.11, 2863-2880.
- HAIR J. F., TATHAM R. L., ANDERSON R. E., BLACK W. Chapter 1 - Introduction. In: Hair J.F., Tatham R.L., Anderson R.E., Black W. (Ed.). *Multivariate Data Analysis*. 5 ed., Nova Jersey, Pearson Education Inc., 23-45, 1998.
- HEM, J. D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, 3a. ed., U.S. Geological Survey. Alexandria, 1985.

HERZ, R. *Circulação de águas de superfície da Lagoa dos Patos*. 1977. 722f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.

JOLLIFFE I. T. *Principal component analysis*. New York: Springer-Verlag; 1986.

KOSKI-VÄHÄLÄ, J. & HARTIKAINEN, H. 2001. Assessment of the risk of phosphorus loading due to resuspended sediment. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 30, 960-966.

LEE, Y.W.; KIM, G.; LIM, W. A.; HWANG, D. W. 2010. A relationship between submarine groundwater-borne nutrients traced by Ra isotopes and the intensity of dinoflagellate red-tides occurring in the southern sea of Korea. *Limnol. Oceanogr.* v. 55, 1–10.

LOUSADA, E. O. *Estudos hidroquímicos e isotópicos no Distrito Federal: modelos conceituais de fluxo*. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasília, 2005. 128p.

MACHADO, C. S. *Balanço hídrico superficial da Lagoa dos Patos e sua influência sobre a água subterrânea*. 2007. 141p. Dissertação (Mestrado em Eng. Oceânica), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 2007.

MACHADO, C. S.; NIENCHESKI, L. F. H.; ATISSANO, K. A Lagoa dos Patos como recarga de um aquífero freático costeiro. *Anais...* Simpósio Brasileiro de Oceanografia, São Paulo, 2006.

MADUREIRA Fº. J. B.; ATENCIO, D. & MCREATH, I., 2000. Minerais e rochas: constituintes da Terra sólida. p. 27-42. IN: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R. & TAIOLI, F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 2ª Reimpressão, 2003. 568 pp 558.

MEE, L. D. 1978. Coastal Lagoons. *Chemical Oceanography*. J. P. Riley and R. Chester.

MIRLEAN, N.; MACHADO, M. I.; OSINALDI, G. M.; DEMOLINIR, A.; BAISCH, P. 2005. O impacto industrial na composição química das águas subterrâneas com enfoque de consumo humano (Rio Grande, RS). *Quim. Nova*. v. 28, n.5, 788-791.

MOORE, W. S. 1999. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water. *Marine Chemistry*. v. 65: 111–125.

MOORE, W. S. 2010. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annu. Rev. Mar. Sci.* v. 2, 59–88. DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081019.

MOORE, W. S., 1999. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water. *Marine Chemistry*. v. 65, 111–125.

NIENCHESKI, L. F. H., WINDOM, H. L., MOORE, W. S.; JAHNKE, R. A. 2007. Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil. *Mar. Chem.* v. 106 (3-4), 546-561.

OLIVEIRA, G. S.; SATYAMURT, P. O. 1998. Evolução e impactos no Brasil. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia, 10, 1998. Brasília, DF, *Anais*. Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. CD-ROM.

PAIVA, M. L. *Sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: relação com a oceanografia*. 2013. 79p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 2013.

PANT, H. K. & REDDY, K. R. 2001. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 30, 1474-1480.

PAULA, G. M. *O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a erosividade das chuvas em Santa Maria-RS*. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

PELLEGRINI, J. B. R. Fósforo na água e no sedimento na microbacia hidrográfica do Arroio Lino, Agudo – RS. 2005. 98p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2005.

PEREIRA, P. S. *Variabilidade da orla oceânica do Rio Grande do Sul e suas implicações na elaboração de planos de contingência: aspectos morfodinâmicos, sedimentológicos e geomorfológicos*. Dissertação (Mestrado em Oceanografia). Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande. 2005. 160p.

PIPER, A. M. 1994. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis, *American Geophysical Union Transactions*, v. 25, 914–928.

RIBEIRO, M. L., LOURENCETTI, C., PEREIRA, S. Y. P., MARCHI, M. R. R. 2007. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, v. 30, n. 3, 688-694.

RICHTER, B. C. & KREITLER, C. W. *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-Water Salinization*, edited by K. C. Smoley, 258 pp., CRC Press, Boca Raton, Fla., 1993.

RUTTEMBERG, K. C. (1992). Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and Oceanography*, 37 (7): 1460-1482. doi: 10.4319/lo.1992.37.7.1460.

SERPA, C. G. Morfodinâmica praial relacionada a presença de corpos de água intermitentes em duas praias da costa do Rio Grande do Sul, Brasil. 2013. 131p. Tese (Doutorado em Oceanografia), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande-RS, 2013.

SHARPLEY, A. N.; SMITH, S. J.; JONES, O. R. et al. 1992. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 21, 30-35.

SONG, J. M. 2010. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas. *Springer, Berlin Heidelberg*, 676p. doi: 10.1007/978-3-642-04060-3.

STRICKLAND, J. D. & PARSONS, T. R. *A practical handbook of seawater analysis*. Fish Res.Board. Can. Bull. v.163, 310p, 1972.

STRIEDER, A.; FONTOURA, B. S.; BEHLING, J. S.; WETZEL, R. S.; DUARTE JR, R. S. S.; DA SILVA, T. C.; MENDES, P.; NÓBREGA, A. A. V.; NIENCHESKI, L. F. H. 2015. Gravitational tectonics evidences at RGS (Brazil) Coastal Plain using Ground Penetrating Radar. *Anais*, 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Florence, Italy, 2015.

TOMAZELLI, L. J. & VILLWOCK, J. A. 1991. Geologia do Sistema Lagunar Holocênico do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, v. 18 (1), 13-24.

TOMAZELLI, L. J. & VILLWOCK, J. A. 2000. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. In: Holz, M. & De Ros, L. F. eds. *Geologia do Rio Grande do Sul*. Edição CIGO/UFRGS, Porto Alegre, p. 375-406.

TOMAZELLI, L. J. 1990. Contribuição ao estudo dos sistemas deposicionais holocênicos do nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul - Com ênfase no sistema eólico. Tese (Doutorado em Geociências). Porto Alegre, UFRGS. 270 p.

TÓTH J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. 1963. *J Geophys Res.* v. 68, 4795–4812.

VALIELA, I.; COSTA, J.; FOREMAN, K.; TEAL, J. M.; HOWERS, B.; AUBREY, D. 1990. Transporte of groundwater-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal Waters. *Biogeochemistry*. v. 10, 177 – 197.

VILLWOCK, J. A. & TOMAZELLI, L. J. 1995. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, v. 8, 1 - 45.

VILLWOCK, J. A. & TOMAZELLI, L. J. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual. 2007. In: Becker, F. G.; Ramos, R. A.; Moura, L. A. (Org.). *Biodiversidade. Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, planície costeira do Rio Grande do Sul*. 1^a ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/SBF, 2007, p. 1-388.

WARD, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistics Association*, v. 1 (58): 236-244.

WINDOM, H. & NIENCHESKI, L. F. 2003. Biogeochemical processes in a freshwater-seawater mixing zone in permeable sediments along the coast of Southern Brazil. *Mar. Chem.* v. 83(3-4), 121 - 130.

WINDOM, H., MOORE, W. S., NIENCHESKI, L. F., JAHNKE, R. 2006. Submarine groundwater discharge: a large, previously unrecognized source of dissolved iron to the South Atlantic Ocean. *Mar. Chem.* v. 102, 252 - 266.

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. 1998. Groundwater and surface water: a single resource. U. S. Geological Survey Circular 1139. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/#pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2015.

YARIV, S.; CROSS, H. Geochemistry of Colloids Systems for Earth Scientists New York: Berlin-Heidelberg, 1979, 450 p.

ZOZ, T.; LANA, M. C.; STEINER, F.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R. 2009. Influência do pH do solo e de fertilizantes fosfatados sobre a adsorção de fósforo em latossolo vermelho. *Synergimus scyentífica UTFPR*. v. 04 (1).

CAPÍTULO II: FLUXOS DE NUTRIENTES ASSOCIADOS À DESCARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (SGD) ESTIMADA A PARTIR DA LEI DE DARCY PARA A REGIÃO COSTEIRA DA LAGOA DOS PATOS (RS-BRASIL)

RESUMO

A descarga de água subterrânea (SGD) é um parâmetro de grande importância no aporte de elementos dissolvidos do continente para o oceano, principalmente em locais onde há a presença de aquíferos costeiros, como é o caso da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS). No entanto, a SGD e suas componentes associadas foram estimadas a partir da aplicação da Lei de Darcy e do balanço de sal a partir de dados obtidos em poços distribuídos na zona de praia (estuário subterrâneo), juntamente com as concentrações dos nutrientes inorgânicos dissolvidos, que resultam nos fluxos desses nutrientes para a região costeira contígua. O resultado encontrado pela Lei de Darcy foi bastante satisfatório com uma SGD estimada de $3,86 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$, semelhante a encontrada a partir dos radioisótopos ($3,57 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$) na região costeira de Mostardas-RS, ressaltando a eficácia deste método para a região de estudo. Diferentes cenários de baixo e alto nível da Lagoa dos Patos mostraram alterar a disponibilidade dos nutrientes ao longo do percurso continente-estuário subterrâneo. Em período de menor nível, este fluxo torna-se mais significativo, podendo aumentar ainda mais o potencial produtivo da região costeira. Com base na relação molar entre o carbono, nitrogênio e fósforo (106C:16N:1P) o P resultou como o nutriente potencialmente limitante no fluxo de água do estuário subterrâneo para a zona de surfe, fornecendo um elevado potencial produtivo ao ambiente ($2735 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$). Portanto, a SGD mostrou-se como uma ferramenta de grande importância para avaliação dos fluxos de nutrientes entre o continente-oceano, desempenhando um papel significativo no entendimento da biogeoquímica das zonas costeiras.

Palavras-chave: descarga de água subterrânea; fluxos; nutrientes.

ABSTRACT

The submarine groundwater discharge (SGD) is a very important parameter in the input of dissolved elements from the continent towards the ocean, mainly in regions where there are coastal aquifers, such as the Coastal Plain of Rio Grande do Sul (CPRS). However, SGD and their associated components were estimated from the application of Darcy's Law and the salt balance from the wells distributed at beach area (subterranean estuary), along with the concentrations of dissolved inorganic nutrients, resulting in flows of these nutrients to the adjacent coastal region. The result found by Darcy's Law was very satisfactory with SGD estimated to $3,86 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$, similar to that from radioisotopes ($3,57 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$), in the coastal region of Mostardas-RS, highlighting the effectiveness of this method for the study area. Different scenarios of low and high level of Patos Lagoon showed change the availability of nutrients along the continent-subterranean estuary path. In lower-period, this flow becomes more significant and may further increase the productive potential of the coastal region. Based on the molar ratio of carbon, nitrogen and phosphorus (106C:16N:1P), phosphorus resulted as the potentially limiting nutrient in the flow of water in the subterranean estuary to the surf zone (F2), providing a high productive potential to the environment ($2735 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$). Therefore, SGD has proved to be a very important tool to evaluation of nutrients flows between continent-ocean, playing a significant role in the biogeochemistry of coastal areas.

Keywords: Submarine groundwater discharge; fluxes; nutrients.

1 INTRODUÇÃO

A descarga de água subterrânea (SGD – submarine groundwater discharge) é considerada como um dos principais processos atuantes do abastecimento de água nas zonas costeiras (FETTER, 2001). Seu uso como uma das mais importantes fontes de elementos dissolvidos para as águas superficiais é muito recente devido à dificuldade de avaliação e percepção de que representava um processo de pouca significância (BURNETT et al., 2003; MOORE, 1996; SLOMP & VAN CAPPELLEN, 2004; BURNETT et al., 2006). Contudo, o desenvolvimento de técnicas que possibilitam avaliar sua importância volumétrica e química, além da grande relevância na produtividade primária de ambientes costeiros, vem sendo difundidas cada vez mais.

Em aquíferos costeiros, ambientes onde ocorre a conexão física entre um aquífero e o oceano, a SGD torna-se o principal processo de avaliação dos fluxos de água entre as margens continentais e oceânicas (BURNETT et al., 2003), dependente de diversas variáveis como a amplitude de maré, o enriquecimento da água subterrânea, a taxa de recarga e a permeabilidade dos aquíferos (CHARETTE et al., 2003). A SGD, dado a sua definição, apresenta duas principais componentes, sendo (1) a água doce de origem continental, que dependente das características locais, (i.e gradiente hidráulico) e geológicas, pode percolar nos sedimentos e alcançar as zonas costeiras; e (2) a água do mar recirculada, no qual pode penetrar os sedimentos e retornar o oceano devido as forçantes oceanográficas (i.e oscilação da maré). Estes processos ocorrem concomitantemente, portanto, os fluxos de água subterrânea através dos sedimentos incluem ambas as componentes, terrestre e marinha (BURNETT et al., 2003; ATTISANO, 2012).

Em geral, as concentrações dos nutrientes dissolvidos nas águas subterrâneas são superiores comparadas com os corpos hídricos superficiais, como os rios, lagos e estuários (SLOMP & VAN CAPPELLEN, 2004; CHARETTE et al., 2006) e então, quando estes fluxos ocorrem ao longo de áreas muito extensas, o aporte de nutrientes para as águas superficiais em ambientes costeiros pode ser significativo (ANDRADE, 2010; SANTOS et al., 2009). Portanto, mesmo que o transporte de água subterrânea não seja tão evidente quanto o de água superficial (BURNETT & DULAIIOVA, 2003), o primeiro pode ser responsável por grande parte do enriquecimento das águas superficiais em relação aos macro e micronutrientes (nutrientes e

elementos-traço, respectivamente), apresentando teores de mais de uma ordem de magnitude (KROEGER et al., 2007; ANDRADE, 2010; WINDOM et al., 2006; NIENCHESKI et al., 2007).

Para as medições da SGD e seus fluxos associados, é utilizado, basicamente, métodos de medição a partir de modelagem numérica, medições diretas (seepage meters) e traçadores geoquímicos (radioisótopos) (BURNETT, et al., 2006). Porém, a escassez de trabalhos envolvendo estes fluxos e seus impactos no ambiente costeiro, dificulta uma melhor compreensão da real importância da descarga de água subterrânea nesses ambientes, sua interação com os aquíferos e, conseqüentemente, a conservação desses compartimentos hídricos (PAIVA, 2013). Neste capítulo será avaliado os fluxos de água subterrânea a partir do método físico/hidrogeológico da aplicação da Lei de Darcy (DARCY, 1856). Este tipo de abordagem é inédito para os aquíferos costeiros da barreira arenosa e será comparada com os métodos de radioisótopos já difundidos em estudos envolvendo a região de pesquisa (NIENCHESKI et al., 2007; WINDOM et al., 2006; PAIVA, 2013; ATTISANO, 2012).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende aquela citada no capítulo anterior que envolve os poços distribuídos pela barreira arenosa que separa a Lagoa dos Patos do Oceano Atlântico (Figura 2). Além dos poços permanentes, neste capítulo será abordado os poços piezométricos desde o pós-praia até a zona de espraiamento que servirão para os cálculos do balanço de sal e posterior cálculo da SGD.

2.2 METODOLOGIA DE COLETA E PROCESSAMENTO

2.2.1 Poços permanentes (barreira)

Neste capítulo é utilizado apenas a série temporal dos 9 anos de dados de nutrientes do poço 3 (contíguo ao oceano, transecto norte) em suas três diferentes profundidades (5, 10 e 15 metros).

2.2.2 Poços piezométricos

Para a coleta de água subterrânea ao longo da praia (poços piezométricos) (Figura 12), utilizou-se um sistema de *Push-point* que compreende uma vara de aço inox com 1,5 m de comprimento, enterrada de acordo com a profundidade de coleta desejada, possuindo uma ponteira inerte, que é conectada a uma mangueira Masterflex[®] e a uma bomba peristáltica. Um suporte para filtro Millipore[®] com filtro de acetato de celulose com 0,45 µm de poro, acoplado no recalque da bomba de amostragem foi utilizado para filtração em linha das amostras. Esses poços foram efetuados na região de praia, próximo ao poço 3, na barreira arenosa, na forma de transecto/gradiente salino, transversal a linha de praia. Posteriormente, as amostras foram armazenadas e mantidas sob refrigeração até serem feitas as análises.



Figura 12: Coleta de água subterrânea na zona de praia com auxílio de *Push-point*. Fonte: Attisano (2012).

2.2.3 Águas superficiais

As águas superficiais da região de praia (zona de surfe) foram coletadas com auxílio de baldes. Estas coletas foram realizadas concomitantemente e próximas às coletas dos poços piezométricos.

2.3 SENSOR DE PRESSÃO

Para obtenção dos dados de pressão hidrostática e posterior cálculo de condutividade hidráulica dos poços permanentes, foram utilizados sensores HOBOTM. Os sensores foram instalados em quase todos os poços da barreira, pelo menos em uma das profundidades, exceto os poços 6 e 8. Contudo, os sensores foram programados para armazenar os dados a cada 30 minutos, sendo os registros processados pelo software HOBOTM Data Loggers.

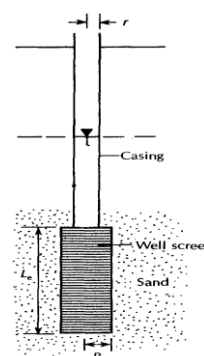
2.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica (Kh) foi obtida nos mesmos poços onde foram adquiridos os dados de pressão hidrostática. São dados inéditos para os poços permanentes e se baseou no método de *slug test* que consiste em modificar a coluna d'água em um pequeno intervalo de tempo e monitorar o nível da água até o seu nível inicial.

Para alteração do nível de água introduziu-se de forma repentina um material sólido de volume conhecido ($0,5 \text{ dm}^3$) para provocar o aumento instantâneo do nível. Enquanto o nível de água retorna ao nível estático, as variações de carga de pressão são medidas em função do tempo. O armazenamento dos dados é feito por um sensor HOBOTM, assim como para a pressão hidrostática, que medem com alta precisão a pressão da coluna de água no interior do poço a cada 1 segundo. No software, o resultado é a posição do nível de água *versus* o tempo.

Para o dado final de Kh utilizou o método de Hvorslev (FETTER, 2001). Este método baseia-se na identificação do valor correspondente ao tempo que leva para o nível da água subir ou baixar 37% (t_{37}) do nível inicial do aquífero, encontrado a partir de cálculos com os valores da curva exibida pelo HOBOTM Pro. É uma metodologia de fácil e rápida aplicação, baixo custo além de dispensar o bombeamento de água nos poços. A seguir é apresentado a equação de Hvorslev.

$$Kh = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2 * L_e t_{37}}$$



Onde:

K_h – Condutividade hidráulica (cm/s);

r – Raio da ponteira (cm);

R – raio do poço (cm);

L_e – Comprimento da parte do poço exposta ao aquífero;

t_{37} – Tempo que o nível demora para retornar 37% do nível inicial.

2.5 LEI DE DARCY

Os dados de condutividade hidráulica são baseados nos princípios da Lei de Darcy (1856) que descreve o fluxo de um fluido em meios porosos. De acordo com esta lei, a velocidade de percolação da água no solo é proporcional ao seu gradiente hidráulico (Darcy, 1856). A seguir, é apresentado a equação simplificada:

$$Q = K_h \cdot A (h_1 - h_2) / L$$

Onde:

K_h – Condutividade hidráulica

A – Área total de advecção

h_1 – Nível do lençol freático (diferença entre a altimetria do poço e a profundidade da coluna d'água).

h_2 – Nível médio da lagoa no dia de amostragem

L – Distância do poço até o oceano/lagoa ou entre os poços.

Através da aplicação da Lei de Darcy é possível quantificar a componente de água doce (Q_{fw}), parte da fórmula do cálculo da SGD ($SGD = Q_{fw} + Q_{sw}$), onde Q_{sw} é a componente que representa o fluxo de água do mar recirculada nos sedimentos permeáveis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A SGD foi estimada para a região norte da barreira da Lagoa dos Patos, próximo ao município de Mostardas-RS através da aplicação da Lei de Darcy (1856). Os cálculos dos fluxos de nutrientes via SGD foram feitos utilizando a média das concentrações dos nutrientes das três profundidades do poço 3 (mais próximo ao oceano) do transecto norte da barreira, bem como os dados dos poços de praia (poços piezométricos, cerca de 1 metro de profundidade) e as concentrações dos nutrientes obtidas na coluna d'água, na zona de surfe, região contígua ao poço 3.

Optou-se por esta estratégia de amostragem, pois é sabido que na parte norte da barreira da LP o gradiente hidráulico é maior (NIENCHESKI et al., 2007), comparado com as regiões centrais e sul. Além disso, os resultados obtidos servirão de comparação com os resultados encontrados por Lima (2014), que estimou a SGD e seus fluxos associados usando a metodologia a partir de radioisótopos no mesmo local do presente estudo. Portanto, visto que a SGD apresenta duas principais componentes, de água doce (Q_{fw}) e de água marinha recirculada pelos sedimentos (Q_{sw}), é necessário avaliar os três ambientes envolvidos nos fluxos, como as águas subterrâneas continentais (poços da barreira); as águas subterrâneas da zona de praia e a relação dos nutrientes com o gradiente de salinidade, no estuário subterrâneo; e as águas superficiais da zona de surfe, apresentando as transformações dos elementos dissolvidos quando essas águas subterrâneas atingem o mar.

Dados essas premissas, a seguir é apresentado a variação da salinidade e dos nutrientes inorgânicos dissolvidos no estuário subterrâneo, avaliando os processos biogeoquímicos ocorrentes neste ambiente, assim como os nutrientes da zona de surfe. A concentração dos nutrientes do poço 3 (permanente) são aquelas apresentadas na Tabela 1, capítulo 1, referente a série temporal dos nove anos de dados.

3.1 VARIAÇÃO DA SALINIDADE E NUTRIENTES NO ESTUÁRIO SUBTERRÂNEO E ZONA DE SURFE

Os valores de salinidades nas amostras de águas no estuário subterrâneo (poços de praia) variaram entre 0, no poço mais próximo as dunas (P8), e 30,4 no poço próximo ao oceano (P1), considerando a extensão de praia de aproximadamente 80 metros, com um total de 8 poços

(Tabela 5). Na zona de surfe, o valor médio de salinidade foi de 33,45, com mínimo de 29,6 e máximo de 36,3. A concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos, seguindo os mesmos 8 poços de praia em relação a salinidade, variaram entre 396,54 – 97,8 μM para silicato; 4,37 – 0,05 μM para fosfato; 41,17 – 4,6 μM para nitrogênio amoniacal; 0,41 – 0,16 μM para nitrito; e 4,75 – 1,62 μM para nitrato. Na zona de surfe, variaram entre 9,77 – 78,73 μM de silicato; 0,16 – 0,8 μM fosfato; 1,13 – 6,87 μM N amoniacal; 0,005 – 0,29 μM nitrito; e 1,15 – 6,63 μM nitrato.

Porém, como pode ser observado na Figura 13, nem sempre isso acontece. Em alguns casos, essas concentrações são equivalentes. Tal fato demonstra que a um metro de profundidade ocorre uma zona de mistura, onde a parcela de água subterrânea corresponde a recirculação de água marinha e mistura com água doce subterrânea, indicando que as amostras foram coletadas na porção superficial do lençol freático. O processo de recirculação da água salgada através dos sedimentos permeáveis, além de responsável pela manutenção do estuário subterrâneo, pode influenciar significativamente os processos biogeoquímicos que acontecem na zona de mistura (WINDOM et al., 2006; NIENCHESKI et al., 2007; ATTISANO, 2010).

Tabela 4: Distribuição da salinidade e média dos nutrientes inorgânicos dissolvidos (μM) nos poços de praia e zona de surfe adjacente, referente a diversas campanhas amostrais.

POÇOS DE PRAIA							ZONA DE SURFE					
PC	Sal.	SiO ₄ ⁴⁻	PO ₄ ³⁻	NH ₄	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Sal.	SiO ₄ ⁴⁻	PO ₄ ³⁻	NH ₄	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
1	30,4	141,18	1,16	4,6	0,21	4,39	29,6	11,56	0,67	6,87	0,07	5,47
2	23,8	178,65	0,69	7,0	0,39	3,7	34,6	39,76	0,39	6,8	0,01	2,02
3	17,8	175,27		31,6	0,26	2,24	31	9,77	0,8	1,13	0,12	2,65
4	12,1	153,86	0,05	35,75	0,16	3,37	35,87	24,16	0,16	2,43	0,29	6,63
5	6,4	167,1	1,02	9,93	0,41	3,16	36,3	16,25	0,47	1,95	0,18	1,88
6	3,8	396,54	1,14	41,17	0,25	1,62	33,3	78,73	0,68	2,32	0,06	1,15
7	1,6	317,66	1,23		0,21	2,76	33,45	30,04	0,53	3,58	0,12	3,3
8	0	97,8	4,37	19,0	0,31	4,75						
Média	12,0	203,51	1,38	21,29	0,28	3,25	33,45	30,04	0,53	3,58	0,12	3,30

As concentrações de silicato (SiO_4^{4-}) nas águas subterrâneas foram superiores aos da zona de surfe com valores praticamente constantes no estuário subterrâneo, exceto entre as salinidades 0 – 5, onde tiveram as mais altas concentrações. O silicato pode ser considerado como um bom traçador de água subterrânea em águas costeiras (KIM et al., 2005; ATTISANO et al., 2013), pois geralmente, forma um gradiente negativo com o aumento da distância da linha de costa, o que indica a influência da SGD na variação espacial das concentrações deste elemento (PAIVA, 2013). De acordo com Niencheski et al. (2007), o silicato pode ser removido na interface zona de arrebenção– antepraia como sílica biogênica, porém não é remineralizado tão rapidamente quanto o nitrogênio e fósforo. A rápida ciclagem do N e P, juntamente com altas taxas de produção primária na zona de arrebenção pode funcionar como um mecanismo eficiente no trapeamento da sílica nesta região.

O fosfato não apresentou grande variação em sua concentração em relação ao estuário subterrâneo e zona de surfe, exceto no poço de salinidade zero, com valor de $4,37 \mu\text{M}$. Geralmente, os teores de PO_4^{3-} são maiores em águas subterrâneas pelos processos de mistura entre as águas doces e salgadas que ocorrem no estuário subterrâneo, pois favorece a competição entre os íons dissolvidos na água do mar com o fosfato adsorvido na superfície das partículas (BAUMGARTEN & NIENCHESKI, 1998; ATTISANO, 2012).

Os teores de nitrogênio amoniacal (NH_4) foram, em grande parte das amostras, maiores na água subterrânea comparado com as águas superficiais da zona de surfe. Esse comportamento já é esperado para este nutriente, pois os compostos nitrogenados variam em função das condições de oxidação-redução do ambiente. Em ambientes redutores, anóxicos ou semi-óxicos, o NH_4 tende a ser mais abundante em função dos processos de amonificação e denitrificação (SLOMP & VAN CAPPELLEN, 2004). O nitrito apresentou, basicamente, o mesmo comportamento do N amoniacal, com concentrações maiores nas águas subterrâneas na maioria das amostras.

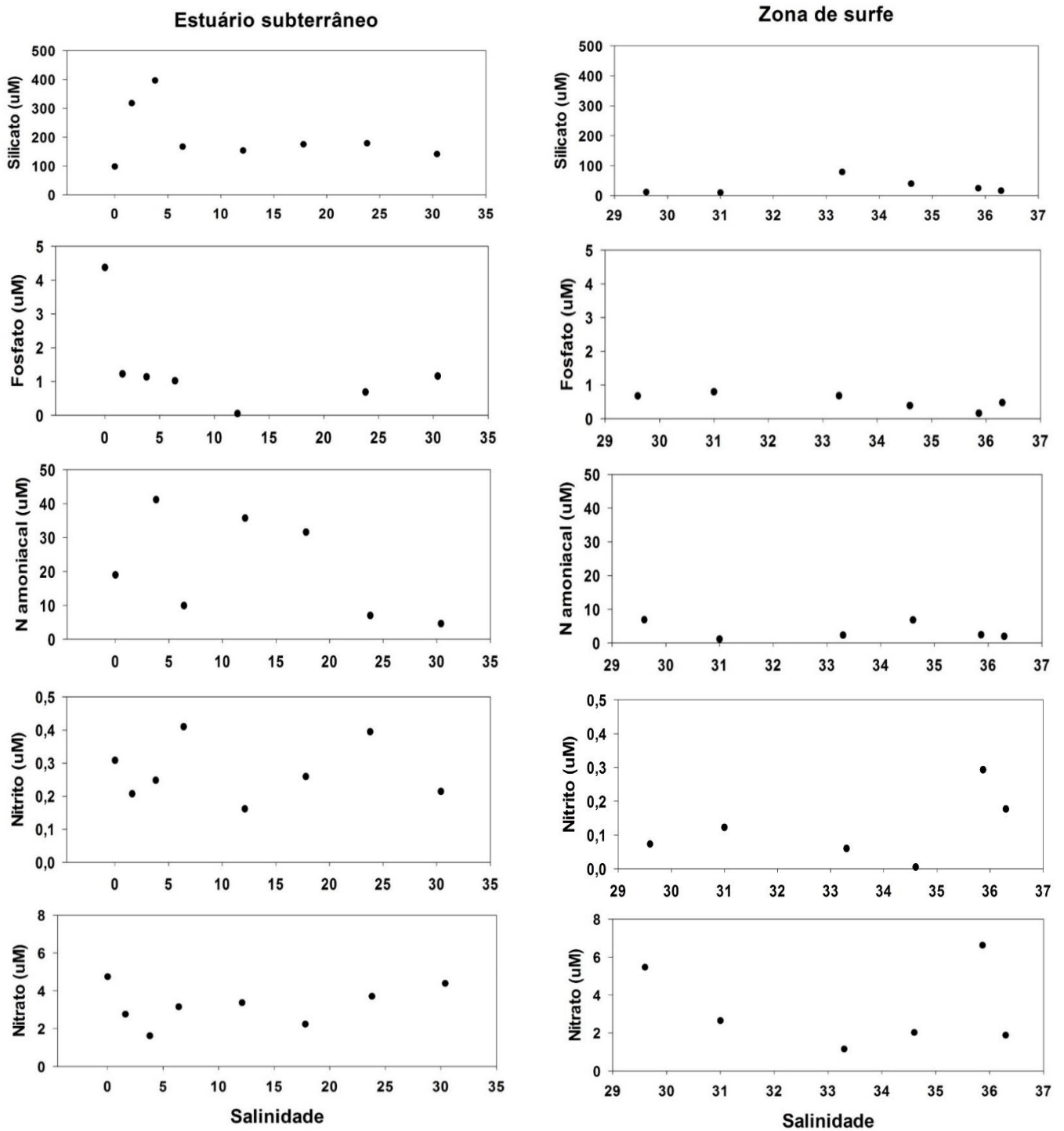


Figura 13: Distribuição dos nutrientes (μM) em função da salinidade na zona de praia (estuário subterrâneo) e zona de surfe (água superficial).

Em relação ao nitrato, forma mais oxidada do nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), espera-se que a concentração deste nutriente seja maior nas águas superficiais pela maior facilidade de trocas do oxigênio entre a camada oceano-atmosfera e também por ser a forma mais estável dentre as espécies químicas de nitrogênio que foram avaliadas. Porém, este padrão não se apresenta muito marcado talvez pelo fluxo significativo de água subterrânea nos sedimentos e os altos índices de NH_4^+ quando comparados com as águas superficiais, acarretando em um menor tempo de residência dessas águas e, conseqüentemente, menor incorporação de elementos químicos na sua composição. Portanto, o baixo tempo de residência da água subterrânea pode não ser suficiente para que os processos de denitrificação ocorra, bem como os processos de remineralização que podem interferir com maiores teores de N amoniacal (ATTISANO, 2012). O nitrito também não apresentou concentrações maiores nas águas superficiais, enfatizando a influência da recirculação da água marinha no estuário subterrâneo, onde ocorre uma zona de mistura entre a água doce continental e a água salgada do oceano.

Em sequência, obtido os dados de nutrientes do poço 3 (barreira), do ES e da ZS, bem como a interpretação dos processos biogeoquímicos desses elementos no ambiente, tem-se as condições necessárias a estimativa dos fluxos de nutrientes associados a SGD. Portanto, de posse desses resultados é possível avaliar os fluxos de água doce a partir dos poços da barreira, os fluxos de água do mar que recircula pelos sedimentos permeáveis no estuário subterrâneo, os teores de nutrientes na água superficial marinha (zona de surfe) e, por fim, a contribuição destas componentes junto com as concentrações dos nutrientes dissolvidos nas águas subterrâneas. A melhor forma de avaliar estas interações continente-oceano em função da SGD é através do modelo conceitual de fluxos elaborado por Niencheski et al. (2007), que será discutido a seguir (Figura 14).

3.2 DESCARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (SGD)

Niencheski et al., (2007) desenvolveram um modelo conceitual representado por quatro vetores que relacionam os fluxos de elementos dissolvidos do continente em direção ao oceano a partir da água subterrânea nos sedimentos permeáveis (Figura 14). O modelo não leva em consideração as transformações químicas que ocorrem no estuário subterrâneo (semelhantes aos estuários superficiais), que incluem os processos de denitrificação, dessorção do nitrogênio

amoniaco devido a intrusão de água salgada e o trapeamento do fósforo a óxidos/hidróxidos de ferro (CHARETTE & SHOLKOVITZ, 2002).

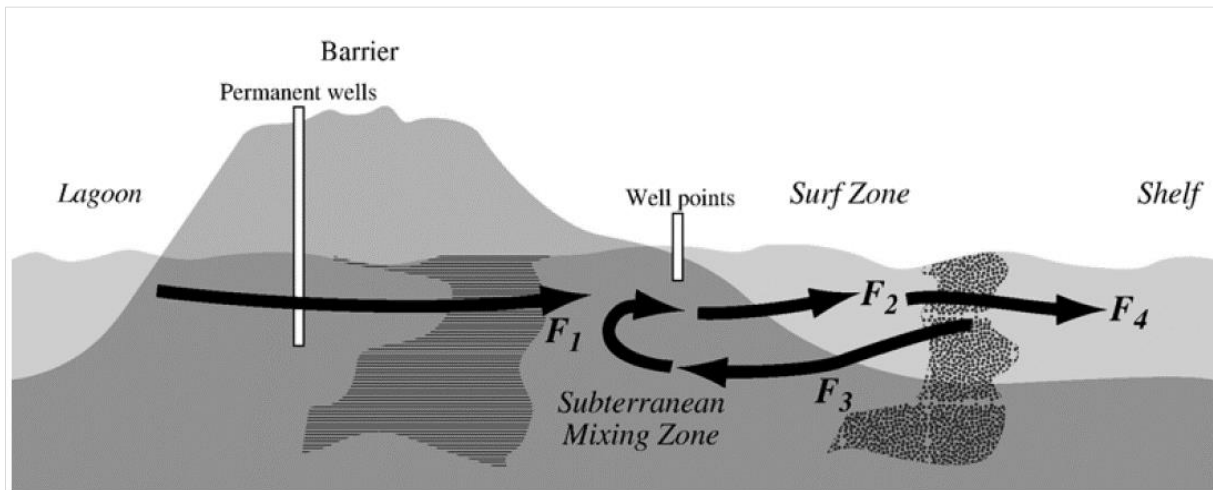


Figura 14: Modelo conceitual dos fluxos de elementos dissolvidos no sistema costeiro subterrâneo e superficial (NIENCHESKI et al., 2007).

Esses fluxos podem ser associados as concentrações de qualquer elemento e, quando relacionados com as concentrações dos nutrientes, proporcionam um melhor entendimento a respeito dos processos biogeoquímicos de adição e remoção dos mesmos. Dessa forma, a avaliação desses fluxos é de grande importância para a produtividade primária de zonas costeiras com influência de aquíferos costeiros. Em seguida, serão apresentados os fluxos e as componentes de água doce (Q_{fw}) e água salgada (Q_{sw}), principais componentes da SGD, em função da mesma área de estudo avaliado por Lima (2014), sendo de 90 Km de extensão, representando toda a área costeira do município de Mostardas-RS, por 10 Km em direção *offshore*.

3.2.1 Lei de Darcy – componente de água subterrânea continental (Q_{fw})

Com a aplicação da Lei de Darcy é possível quantificar a componente de água doce continental (Q_{fw}) a partir de dados físicos dos poços permanentes, considerando determinada área de advecção da água. Com base na fórmula ($Q = Kh \cdot A (h_1 - h_2)/L$) descrita detalhadamente no item 2.5 é possível obter essa componente para todos os poços permanentes da barreira e em qualquer direção, desde que tenha um gradiente hidráulico positivo. Neste estudo foi calculado o Q_{fw} considerando o poço 3 (permanente) em suas três profundidades (5, 10 e 15m), no transecto norte, local onde tem-se dados de SGD a partir da taxa de advecção por

radioisótopos (NIENCHESKI et al., 2007; LIMA, 2014) para comparação, além do gradiente salino e de nutrientes dos poços de praia (piezométricos) para os cálculos dos fluxos.

O valor médio encontrado de Q_{fw} , em relação as três profundidades foi de $1,61 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ e representa o fluxo de água subterrânea do poço 3 em direção à zona de praia (F1) estimado para uma área total de SGD de 90 Km de linha de costa, abrangendo toda a zona costeira de Mostardas, e 10 Km de plataforma. Esta área para avaliação da SGD foi definida apenas para a região de Mostardas devido os resultados obtidos no capítulo 1, referentes a caracterização dos diversos aquíferos da barreira. Foi encontrado uma ampla variabilidade em termos de nutrientes nesses aquíferos costeiros, dependente, principalmente, das suas fontes de recarga (nível de água da LP e precipitação pluviométrica), ressaltando a grande heterogeneidade desse ambiente. Além disso, Moore & Oliveira (2008) ainda salienta a divergência dos fluxos de água subterrânea conforme as diferentes características geológicas de cada sistema de aquíferos, no qual cada um deles terá a sua própria interface de água doce e salgada. Os dados de condutividade hidráulica (Kh), nível do lençol freático (h_1), nível médio da Lagoa dos Patos (h_2) e a distância entre os poços e o limite máximo estabelecido de plataforma continental (L) estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 5: Dados para estimativa da SGD a partir do poço 3, diferenciando os valores de condutividade hidráulica (Kh) em cada uma das profundidades.

	Kh (m/dia)	Extensão da costa (m)	L (m)	h_1 (m)	h_2 (m)
P3 5	115,8	90.000	10.000	0,25	0,0
P3 10	118,5	90.000	10.000	0,25	0,0
P3 15	74,86	90.000	10.000	0,30	0,0

Os estudos pretéritos envolvendo a estimativa da SGD na mesma área de estudo (NIENCHESKI et al., 2007; ATTISANO, 2012; LIMA, 2014) utilizaram isótopos de radio (Ra) para o cálculo do tempo de residência médio das águas subterrâneas e, conseqüentemente, a taxa de advecção, no qual representa a velocidade com que as águas permeiam os sedimentos e chegam ao oceano. Essa taxa de advecção é então, multiplicada pela área total (90 Km x 10 Km), obtendo-se o valor total da SGD. Com base nisso, Lima (2014) encontrou um valor de $SGD = 3,57 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. A partir do balanço de sal proposto por Windom et al. (2006), os

autores estimaram as componentes de água doce (Q_{fw}) e de água do mar recirculada (Q_{sw}), que leva em conta o dado médio de salinidade dos poços de praia. Os valores encontrados foram de $Q_{fw} = 2,28 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ e $Q_{sw} = 1,28 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Já com base no presente estudo, foi obtido o valor de $Q_{fw} = 1,61 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ através do método da Lei de Darcy, e através do balanço de sal tendo como salinidade média dos poços de praia igual a 21, foi encontrado um valor de $Q_{sw} = 2,25 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Por fim, a SGD total foi estimada em $3,86 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$, onde $SGD = (Q_{fw} + Q_{sw})$.

Tabela 6: Estimativa da descarga de água subterrânea (SGD) e suas componentes de água doce (Q_{fw}) e água salgada (Q_{sw}) comparando os métodos da Lei de Darcy e radioisótopos para a mesma área de estudo.

	SGD (90Km)	SGD (240Km)	Q_{fw} (90Km)	Q_{fw} (240Km)	Q_{sw} (90Km)	Q_{sw} (240Km)
Lei de Darcy (2015)	3,86	10,4	1,61	4,3	2,25	6,1
Radioisótopos (LIMA, 2014)	3,57		2,28		1,28	
Radioisótopos (NIENCHESKI et al., 2007)		8,5		3,1		5,4

Indo além mesmo sabendo da heterogeneidade do ambiente, e extrapolando a estimativa da SGD para toda a barreira da LP considerando seus 240 Km de extensão e os 10 Km em sentido *offshore*, obtêm-se um valor de $SGD = 10,4 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. E valores de $Q_{fw} = 4,3 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ e $Q_{sw} = 6,1 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. Os resultados, mais uma vez, mostraram-se bastante satisfatórios, uma vez que Niencheski et al., (2007) encontraram valores bem parecidos, como mostra a tabela 7. Portanto, realizado as estimativas da descarga de água subterrânea (SGD) e suas componentes exclusivamente a partir da aplicação da Lei de Darcy, os resultados provaram que este método é extremamente eficaz para os cálculos de fluxos de água subterrânea para a região de estudo. Além disso, esta metodologia é fácil aplicação e de baixíssimo custo comparado a metodologia dos radioisótopos, pois é utilizado apenas dados de pressão hidrostática com uso de sensores de nível para cálculo da condutividade hidráulica, baseado no método de Hvorslev (FETTER, 2001), item 2.4.

3.2.2 Fluxos de nutrientes associados a SGD

Usando as equações estabelecidas por Niencheski et al. (2007), calculou-se: (F1) fluxo de nutrientes de água doce continental para o estuário subterrâneo (ES); (F2) fluxo de água subterrânea do ES para a zona de surfe; (F3) fluxo de água marinha recirculada nos sedimentos permeáveis; e (F4) fluxo da zona de surfe para a plataforma continental (Tabela 8). Como discutido anteriormente, para realização desses fluxos subterrâneos é utilizado os dados dos nutrientes do poço 3 na barreira da LP (poço permanente), as componentes da SGD (Q_{fw} e Q_{sw}), obtidas a partir dos dados dos poços do estuário subterrâneo e água superficial da zona de surfe com a aplicação da Lei de Darcy, e a estimativa da SGD em relação a área definida para a região de Mostardas-RS (90Km x 10Km).

Além dos cálculos médios dos fluxos, também foram calculados os fluxos de nutrientes para os diferentes cenários de ‘lagoa cheia’ e ‘lagoa vazia’, representados pelos anos de maior e menor nível da Lagoa dos Patos, respectivamente. Foi definido esta avaliação devido à forte influência na disponibilidade dos elementos químicos nas águas subterrâneas frente a maior ou menor carga hidráulica imposta pela variação de nível da LP, abordado no capítulo 1. Para estes cálculos foram utilizados apenas os dados dos poços permanentes por terem um ‘range’ amostral que abrange quase uma década, enquanto que os dados dos poços de praia e zona de surfe, as amostras foram mais restritas. Deste modo, tem-se a representação da concentração de cada nutriente que pode ser transportado do continente para a zona de praia (F1), onde receberá influência de processos biogeoquímicos do ES nos diferentes cenários. Optou-se pelos anos de 2010 e 2004 (Figura 6, capítulo 1) como os anos de maior e menor nível respectivamente, pois possuem maior número de campanhas amostrais e, portanto, melhor confiabilidade na média das concentrações dos nutrientes.

Esses fluxos de nutrientes são controlados por diversos fatores naturais dado a geologia e características regionais dos aquíferos. Entre esses fatores, estão o tempo de residência das águas subterrâneas e as características sedimentológicas dos aquíferos, que podem enriquecer a composição das águas; as condições do clima, como a taxa de precipitação e evaporação; a produtividade primária, a partir da assimilação planctônica dos nutrientes; a regeneração dos nutrientes e os processos químicos que ocorrem no encontro da água doce e salgada nos

sedimentos (estuário subterrâneo), responsáveis pelos processos de transformação, remoção e adição dos elementos nas águas subterrâneas (ATTISANO, 2012).

Tabela 7: Estimativa dos fluxos médios de nutrientes ($\times 10^6$ mol.dia⁻¹) ilustrado na figura 13, dados médios da série temporal dos dados, anos de alto nível da LP (2010) e baixo nível da LP (2004).

	F1_{médio}	F1_{Lagoa cheia}	F1_{Lagoa baixa}	F2	F3	F4
Silicato	10,0	2,59	12,1	7,86	0,68	7,18
Fosfato	0,066	0,015	0,082	0,053	0,012	0,041
N amoniacal	0,21	0,24	0,92	0,82	0,08	0,74
Nitrato	0,03	0,2	0,08	0,13	0,074	0,051

3.2.2.1 Fluxos de silicato (SiO₄⁴⁻)

Em relação aos fluxos médios de silicato, a mais alta concentração foi no F1 (água continental), diminuindo com a distância da linha de costa. Este elemento é considerado um traçador natural de águas subterrâneas e, sob a forma dissolvida, é de grande importância no metabolismo dos ecossistemas aquáticos como um dos principais nutrientes utilizados pelos produtores primários, principalmente as diatomáceas (ESTEVEZ, 1998). Conseqüentemente, quando este elemento entra em contato com as águas superficiais da zona de surfe, ainda com concentração elevada (F2), essa concentração torna-se significativamente menor pelo processo de diluição e assimilação fitoplanctônica, bem como observado no F3 (NIENCHESKI, et al., 2007).

Assim como avaliado em outros trabalhos envolvendo os fluxos de nutrientes associados a SGD para a mesma região estudo (NIENCHESKI et al., 2007; ATTISANO, 2012; LIMA 2014), os autores também encontraram menores concentrações de SiO₄⁴⁻ para o F4 comparado com o F1 (Figura 15), enfatizando o processo de remoção do silicato no ambiente próximo à costa. Este elemento pode ser biologicamente removido na interface sedimento-água na zona de surfe, sendo um eficiente mecanismo de retirada do silicato que, conseqüentemente, diminui o seu aporte para a plataforma adjacente.

Considerando o cenário de ‘lagoa cheia (2010)’, a concentração de silicato que aporta na zona de praia é significativamente inferior ao fluxo médio de água doce continental (F1_{médio}),

cerca de 75%. A maior influência das águas superficiais devido a elevação do nível da LP pode promover uma diluição nos teores de silicato, juntamente com o alto índice pluviométrico, dado a alta correlação destas variáveis (tabela 2, capítulo 1). Em adição a diluição, os efeitos sinérgicos destas duas fontes de recarga permitem maior renovação das águas subterrâneas no qual os sais em solução podem ser carreados para zonas mais profundas dos aquíferos (DREVER, 1997). Já em relação ao cenário de ‘baixo nível (2004)’, ocorre um acréscimo de aproximadamente 20% do valor médio na concentração de SiO_4^{4-} no F1 (tabela 5) conferindo maior teor deste nutriente ao estuário subterrâneo.

3.2.2.2 Fluxos de fosfato (PO_4^{3-})

O fosfato apresentou a mais alta concentração no F1, fluxo de água subterrânea que provém do continente à zona de praia. Tal comportamento é esperado para este nutriente, uma vez que o fósforo é um elemento essencialmente continental, no qual as principais fontes para o ambiente marinho envolvem o intemperismo das rochas fosfáticas e a lixiviação dos solos a partir da precipitação (RUTEMBERG, 1992). Além disso, assim como apresentado por Slomp & Van Cappellen (2004), é esperado uma redução no fluxo de PO_4^{3-} do continente para a zona de mistura, pois o fluxo está sendo direcionado de um ambiente anóxico (ambiente subterrâneo) para um local semi-óxico (estuário subterrâneo). No primeiro, o fosfato tende a estar desorvido das partículas enquanto que, em ambientes mais oxidados, o P inorgânico tende a se adsorver na superfície de minerais ou estar ligado a outros elementos, como o cálcio, ferro e alumínio (BENITEZ-NELSON, 2000; SONG, 2010; ATTISANO, 2012). Dessa forma, os sedimentos comportam-se como grandes reservatórios de fósforo no ambiente marinho, e podem ser fonte importante deste elemento para a água do mar (GIBLIN et al., 1997; ZABEL et al., 1998; ZHUANG et al., 2014).

Como pode ser observado na Figura 15, os fluxos de PO_4^{3-} têm o mesmo padrão dos fluxos de SiO_4^{4-} , com menor concentração no F3. Ao chegar com alta concentração na zona de praia, onde ocorre a formação do estuário subterrâneo, o fosfato, por ser altamente reativo, pode ser trapeado nos sedimentos de praia pela adsorção nas partículas dos sedimentos e ligar-se aos óxidos/hidróxidos de ferro que possuem alta concentração nesta região (WINDOM et al, 2006), diminuindo seus teores no F2. Quando aportado na zona de surfe (F3), a concentração do fosfato diminui significativamente (cerca de 80%), uma vez que pode ser diluído pelas águas

superficiais e consumido pelos organismos fotossintetizantes. Segundo Ruttemberg (2005), o fósforo é um dos elementos essenciais na vida dos organismos, podendo afetar diretamente na produtividade primária dos ambientes marinhos em relação aos processos metabólicos de material genético e transferência de energia tanto na respiração, quanto na fotossíntese.

Já em relação ao F4, fluxo de água da zona de surfe para a plataforma continental, observou-se que este possui alta concentração em comparação com o F3, com valores próximos ao F1 (cerca de 63%). Os teores de fosfato consumido a partir da produtividade primária na zona de surfe podem ser rapidamente mineralizados, dependente do conteúdo de matéria orgânica presente no solo, tornando-se um processo bastante eficaz na interface sedimento-água. Tal fato pode explicar a semelhança na concentração desses dois fluxos.

Assim como o silicato, as concentrações de PO_4^{3-} no F1 seguiram o mesmo comportamento. Em período de alto nível da LP houve uma diminuição de cerca de 78% no fluxo de PO_4^{3-} , enquanto que em período de baixo nível da LP obteve-se um aumento de aproximadamente 25% na concentração deste nutriente. Esses resultados corroboram com aqueles citados no capítulo 1 em relação aos processos de adsorção e desorção do fosfato nas águas subterrâneas e enfatizam a alta correlação negativa entre este nutriente, o nível da LP e a precipitação acumulada a partir de toda a série temporal.

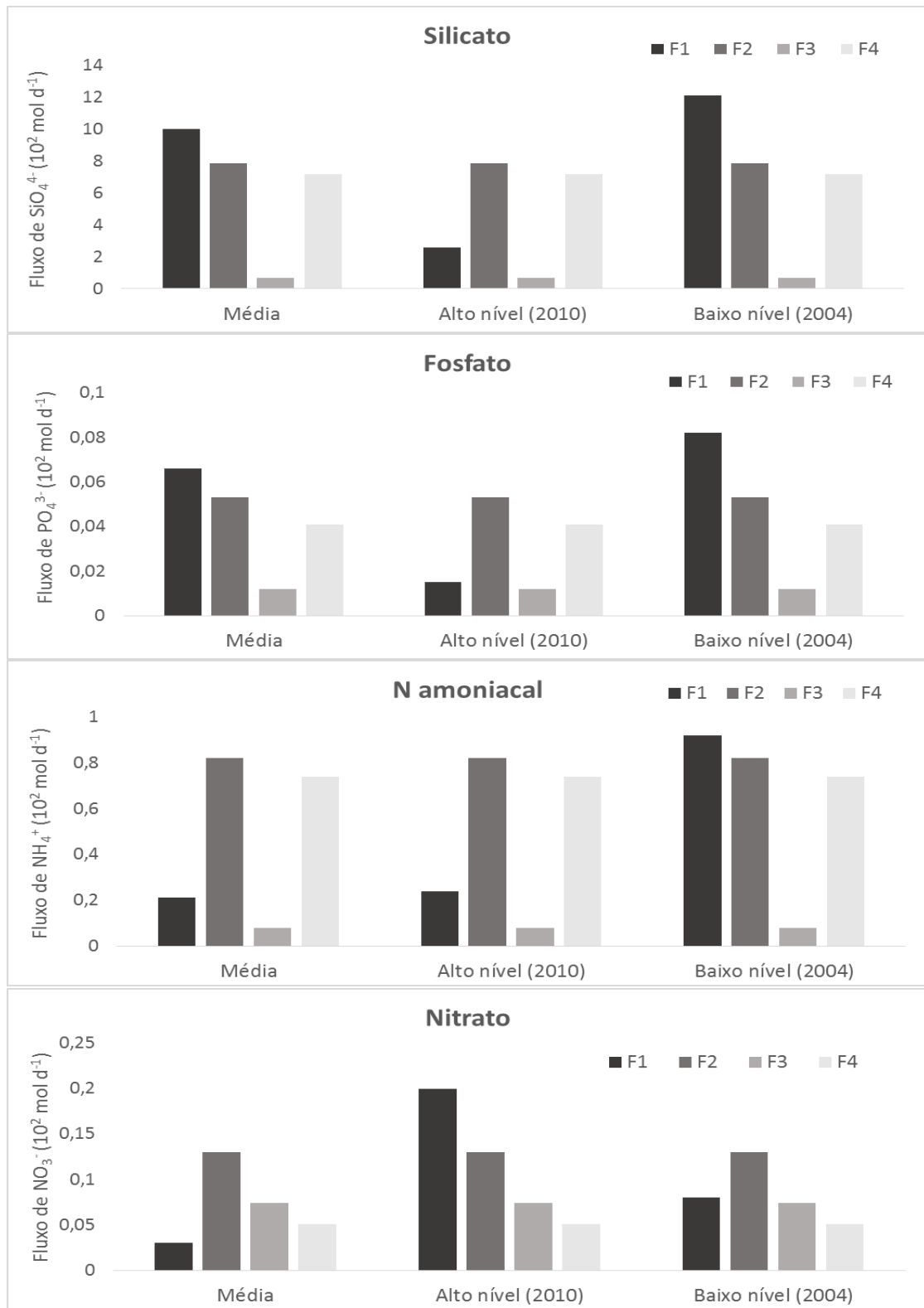


Figura 15: Fluxos médio de nutrientes (SiO_4^{4-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^-) associados a SGD ($10^6 \text{ mol dia}^{-1}$) e F1 em diferentes cenários de alto e baixo nível da Lagoa dos Patos.

3.2.2.3 Fluxos de nitrogenados

Entre os compostos nitrogenados, o nitrato teve a mais baixa concentração no F1. Essa baixa concentração é esperada para este nutriente dado que os níveis de oxigênio dissolvido no ambiente subterrâneo são nulos ou muito baixos. Tal fato caracteriza o ambiente como redutor e favorece os processos de amonificação e denitrificação (SLOMP & VAN CAPPELLEN, 2004; NIENCHESKI et al., 2007). Ao entrar na zona de praia, as concentrações de NO_3^- aumentam, consequência da mistura entre a água doce continental e a água marinha mais oxidada e rica em íons a partir da formação do estuário subterrâneo. O mesmo comportamento é observado para o N amoniacal, porém com concentrações mais elevadas no F1 quando comparado com o nitrato, justamente pelos processos biogeoquímicos decorrentes no estuário subterrâneo.

Quando na zona de surfe (F2 \rightarrow F3), ambos os compostos nitrogenados têm uma diminuição em suas concentrações, efeito da assimilação fitoplanctônica desses nutrientes e diluição pela água superficial. Nota-se que os teores de N amoniacal foram drasticamente reduzidos comparando, em proporção, com os teores de NO_3^- . Carmouze (1994) atenta ao fato de que o NH_4^+ é a primeira forma de nitrogênio liberada pela respiração e, portanto, a forma mais abundante, além de forma preferencial em relação a assimilação do nitrogênio para os microrganismos, o que pode explicar a maior diminuição em sua concentração neste ambiente.

No entanto, ao recircular pelos sedimentos permeáveis na zona de praia (F3), o nitrato volta com concentração superior ao NH_4^+ , pois está sendo direcionado de um ambiente mais oxidado, onde a alta hidrodinâmica da zona de surfe, como as ondas e a baixa profundidade de coluna d'água pode favorecer o processo de nitrificação devido ao aumento nos níveis de oxigênio decorrentes das trocas gasosas com a atmosfera (ATTISANO, 2012). Já em relação ao fluxo da zona de surfe para a plataforma continental (F4), a concentração de NH_4^+ é significativamente maior que a de NO_3^- devido a rápida remineralização desse composto, que mantém a equivalência entre os outros fluxos. Enquanto o nitrato, por ser a forma nitrogenada de maior estado de oxidação e a mais estável entre os compostos nitrogenados inorgânicos, ainda está sendo utilizado na produtividade primária, o N amoniacal é primeiramente remineralizado e, seu 'escape' para a plataforma possui concentração mais elevada.

Comparando o fluxo médio de NO_3^- com os cenários de alto e baixo nível da Lagoa dos Patos, observa-se que este nutriente tem comportamento oposto aos demais citados. Enquanto o NH_4^+ , o PO_4^{3-} e o SiO_4^{4-} têm uma diminuição em suas concentrações no ano de maior nível da LP, o nitrato tem um aumento de cerca de 6 vezes superior o teor médio, com concentração de $0,20 \times 10^6 \text{ mol d}^{-1}$ para a área representada. Quando de maior nível (2010), as águas superficiais da lagoa que são mais ricas em oxigênio dissolvido têm maior contato com as águas subterrâneas a partir de um maior gradiente hidráulico, possibilitando a oxidação dos compostos nitrogenados, conferindo maiores concentrações de nitrato. Em contrapartida, neste mesmo cenário, os teores de NH_4^+ são reduzidos cerca de 41% do valor de fluxo médio justamente pela oxigenação das águas subterrâneas que favorece o processo de nitrificação.

Já em relação ao ano de menor nível da LP (2004), as águas subterrâneas ficam menos sujeitas as fontes de recargas superficiais e, devido a falta ou pouca disponibilidade de oxigênio, a remediação natural do NO_3^- pela denitrificação, nestas condições, pode ser facilitada (BAIRD & CANN, 2011). O baixo nível da LP proporciona um menor gradiente hidráulico, com os níveis do aquífero e da lagoa mais próximos ao equilíbrio hidráulico. Tal fato concede um maior tempo de residência das águas subterrâneas no sistema de aquíferos da barreira e, conseqüentemente, a concentração do F1 de N amoniacal em cenário de baixo nível é significativamente superior ao seu fluxo médio, característica de um ambiente mais redutor.

5.1.3 Influência da SGD na produtividade primária

Devido a grande importância da descarga de água subterrânea (SGD) para as zonas costeiras com influência de aquíferos costeiros, caso da região de estudo avaliada, torna-se importante investigar de que maneira os nutrientes advectados contribuem para o sustento da produtividade primária neste ambiente. Dado que as concentrações desses nutrientes podem ser muito mais elevadas nas águas subterrâneas em comparação com as águas superficiais, o fluxo de nutrientes impõe um significativo potencial de enriquecimento das águas oceânicas (SLOMP et al., 2004; ANDRADE, 2011).

A Figura 16 mostra a relação molar entre o nitrogênio (N) e fósforo (P) proposta por Redfield et al. (1963) para os fluxos no trajeto continente-oceano. Em relação ao fluxo de água subterrânea do continente para a zona de praia (F1), o N foi, potencialmente, o nutriente

limitante, assim como em cenário de baixo nível da Lagoa dos Patos. Já em cenário de alto nível da LP, devido a baixa concentração de PO_4^{3-} dissolvido nesta situação em virtude das características químicas do P no solo, o fósforo apresentou-se como o nutriente limitante. O oposto ocorre no que se refere ao fluxo da zona de praia (estuário subterrâneo) para a zona de surfe (F2). Neste fluxo, o P torna-se o nutriente limitante pelo fato de ficar retido no estuário subterrâneo através dos processos de adsorção deste elemento nas partículas do solo e precipitar em função da associação com os óxidos/hidróxidos de ferro, que possuem elevada concentração nessa região (WINDOM et al., 2006).

No fluxo de água do mar que recircula pelos sedimentos permeáveis (F3), o nitrogênio volta a ser o nutriente limitante, pois quando na zona de surfe, este elemento é consumido pelo fitoplâncton e, portanto, retorna com menores concentrações para o estuário subterrâneo. Por fim, assim como o F2, o fluxo de água da zona de surfe para a plataforma continental (F4) tem o fósforo como limitante. Tal fato pode ter relação com a rápida remineralização do nitrogênio, principalmente na forma de NH_4^+ , primeira forma liberada pela respiração, além de ter uma depleção mais rápida que os demais nutrientes (CARMOUZE, 1994; BURFORD & ROTHILISBERG, 1999). No entanto, levando em consideração que os cálculos de descarga de água subterrânea (SGD) e seus fluxos associados são uma estimativa e, dado a grande variação na concentração dos nutrientes, existe um desvio-padrão implícito que pode impor uma diferenciação na razão molar entre o N e P.

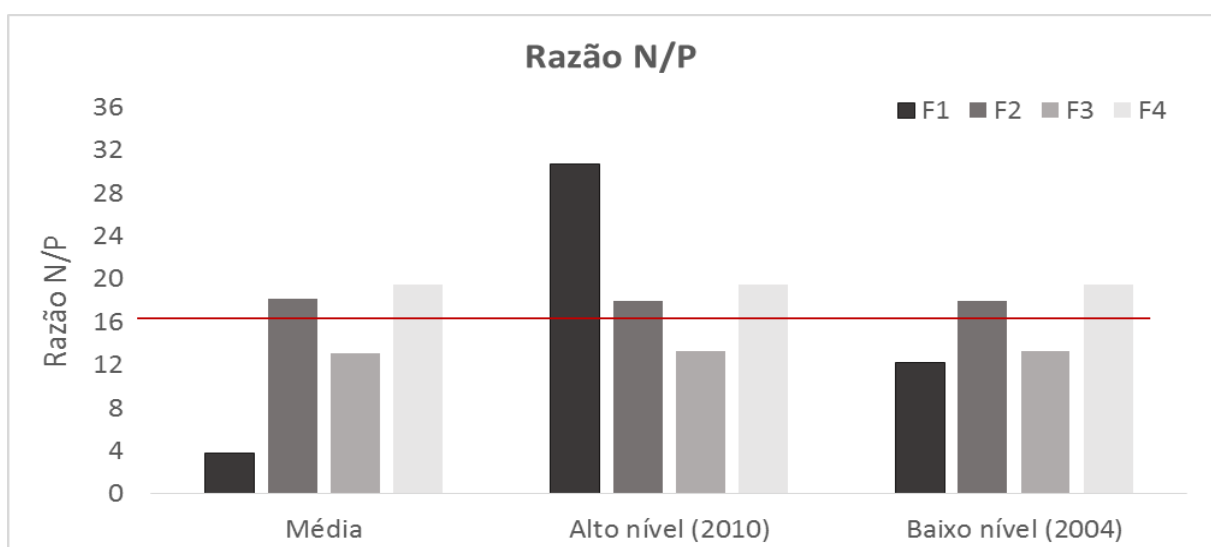


Figura 16: Relação molar entre o nitrogênio (N): fósforo (P) para os fluxos associados à SGD da barreira da Lagoa dos Patos.

Para estimar a produtividade primária potencial sustentada pela SGD através da relação molar de Redfield et al. (1963), é utilizado o fluxo de água subterrânea para a zona de surfe (F2). Nesse caso, o fósforo foi o nutriente potencialmente limitante e, então, a partir do fluxo de PO_4^{3-} estimou uma produção de $7,49 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $2735 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ considerando 100 metros de zona de surfe e 90 Km de extensão da barreira, na região de Mostardas-RS, assim como para os cálculos da SGD e seus fluxos associados. Todavia, nem toda produção encontrada pode ser considerada 'produção nova', uma vez que cerca de 25% do fósforo inorgânico na descarga subterrânea de praia provém da água do mar recirculada (F3). Lima (2014) também estimou a produtividade primária potencial para a região de Mostardas-RS, com valor de $2495 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, muito semelhante ao presente estudo. Niencheski et al. (2007), para a região adjacente à Lagoa dos Patos, encontraram valores de $2931 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Idem para a região sul do RS, onde Attisano (2012) obteve uma produção de $2780 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Esses resultados podem ser comparáveis, pois os cálculos são proporcionais, dependentes da área estabelecida por cada autor.

Os valores encontrados acima ressaltam a importância da descarga de água subterrânea (SGD) na biogeoquímica de ambientes costeiros, que a muitos anos foi ignorada como uma importante fonte de nutrientes (MOORE, 2010), principalmente em locais como a costa do Rio Grande do Sul que sofre influência de corpos hídricos de grande relevância como o complexo lagunar Patos-Mirim. Mesmo sendo heterogênea e dependente das características geológicas regionais, a SGD tem potencial para sustentar uma alta produtividade primária, porém, deve ser considerado outros fatores que podem limitar a produção fitoplanctônica, como a penetração de luz na zona de surfe (NIENCHESKI et al., 2007).

4 CONCLUSÕES

A descarga de água subterrânea (SGD) e seus fluxos de nutrientes associados foram estimados na barreira arenosa que separa a Lagoa dos Patos do oceano Atlântico através da aplicação da Lei de Darcy, uma técnica inédita para os cálculos de SGD dessa região, com valor de $\text{SGD} = 3,86 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ considerando os 90 Km de extensão da barreira e 10 Km *offshore*. A técnica mostrou-se bastante eficaz, uma vez que em estudos pretéritos, Lima (2014)

encontraram valor de $SGD = 3,57 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ a partir de traçadores geoquímicos (radioisótopos), valor muito semelhante ao observado neste estudo. Desse modo, a comparação entre os resultados obtidos para a estimativa da SGD e suas componentes comprova o êxito do método da Lei de Darcy para avaliação de fluxos de água subterrânea na barreira da Lagoa dos Patos. Além disso, é uma metodologia de fácil aplicação e baixo custo, comparado com o dos radioisótopos.

Quando associado a concentração dos nutrientes inorgânicos dissolvidos, a descarga de água subterrânea forneceu os fluxos desses nutrientes no trajeto continente-oceano, onde diversos processos de transformação, remoção e adição de elementos ocorrem no estuário subterrâneo e que são extremamente importantes para a biogeoquímicos desses ambientes costeiros. O fluxo de nutrientes do continente para a zona de praia (F1) foi calculado para diferentes cenários de nível de água da Lagoa dos Patos, conhecido a influência desta variável na disponibilidade dos nutrientes nos aquíferos. Em período de baixo nível da LP, as concentrações dos nutrientes são mais elevadas devido as características físico-químicas de cada elemento no ambiente subterrâneo, exceto para o nitrato, que apresentou maior concentração em período de maior nível.

A relação molar (106C:16N:1P) proposta por Redfield et al. (1963) resultou no fósforo como o nutriente potencialmente limitante no fluxo de água subterrânea do estuário subterrâneo (zona de praia) para a zona de surfe (F2), e um potencial de produtividade primária de cerca de $2735 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Esse valor foi bastante semelhante aos de estudos pretéritos ($2495 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, $2931 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e $2708 \text{ gC m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), enfatizando mais uma vez a grande importância da SGD e os fluxos de nutrientes para zonas costeiras, principalmente em ambientes com características bem marcadas (presença de grandes corpos hídricos superficiais e sedimentos bastante permeáveis), como é o caso da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresenta diversas informações sobre a hidroquímica dos aquíferos costeiros da barreira holocênica que separa a Lagoa dos Patos do oceano Atlântico e o seu potencial de contribuição no aporte de nutrientes a partir da descarga de água subterrânea (SGD). Entretanto, conhecido a importância da SGD na avaliação dos fluxos de água entre o

continente e o oceano, quanto melhor a caracterização do ambiente, melhor será as estimativas da SGD. Para tanto, o conhecimento da estrutura geológica da região de estudo, bem como sua sedimentologia e variação topográfica são exemplos de variáveis que auxiliarão na avaliação da permeabilidade e porosidade dos aquíferos e, portanto, entender como a variação espacial dos sedimentos influencia na descarga de água subterrânea.

Para uma estimativa mais precisa dos fluxos subterrâneos, principalmente para a região de praia, é necessário estender a rede amostral, casando com os dados dos poços permanentes dos outros transectos da barreira (central e sul, poços 6 e 9, respectivamente) e relacionar estas amostragens com as variações sazonais e os diferentes cenários de nível de água da Lagoa dos Patos, principal fonte de recarga dos aquíferos costeiros da barreira. Assim, poderá ser avaliado os fluxos envolvendo os 240 Km de toda a extensão da LP. Em adição, um melhor entendimento do regime hidrológico do ambiente (ventos, precipitação, descarga fluvial, marés) é fundamental para relacionar com a série temporal de nível da LP e, conseqüentemente com os diferentes transectos da barreira (norte, central e sul), uma vez que é conhecido a diferença dos níveis da lagoa nestas três distintas regiões, e que podem alterar o gradiente hidráulico e assim, interferir na disponibilidade dos nutrientes nas águas subterrâneas.

Os fluxos de nutrientes associados à SGD contribuem significativamente para a produção primária da zona costeira adjacente e, visto que estes fluxos atuam de forma contínua podendo ser equivalentes ou até mesmo superior ao balanço de nutrientes imposto pela pluma do Rio da Prata e pela descarga da Lagoa dos Patos. Faz-se necessário uma estimativa mais precisa dos fluxos subterrâneos e estabelecer a importância destes aportes em relação as descargas superficiais, também relacionando as variações sazonais e os diferentes cenários de nível de água da LP, que pode alterar o comportamento dos nutrientes no trajeto continente-oceano e influenciar no aporte de nutrientes desde o estuário subterrâneo até a plataforma continental. Essa estimativa precisa e de fácil aplicação ao longo dos quase 1500 Km de costa (considerando desde Punta del Este até a Ilha de Santa Catarina) com a presença de lagoas costeiras, que aqui foi apresentado, deve ser implementada de forma continuada, para que seja possível a avaliação da influência dos eventos extremos e a variação climática nesta importante região oceanográfica, dominado ao largo pela Convergência Sub-Tropical.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. F. F. Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea na região costeira do extremo sul do Brasil. 2010. 204p. Tese (Doutorado em Oceanografia), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.

ATTISANO, K. K. *Aporte subterrâneo: uma fonte complementar de nutrientes para a costa do sul do Brasil e plataforma adjacente*. 2012. 204p. Tese (Doutorado em Oceanografia), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 2012.

ATTISANO, K. K.; SANTOS, I. R.; ANDRADE, C. F. F.; PAIVA, M. L.; MILANI, I. C. B.; NIENCHESKI, L. F. H. 2013. Submarine groundwater discharge revealed by radium isotopes (Ra-223 and Ra-224) near a paleochannel on the Southern Brazilian continental shelf. *Braz. J. oceanogr.* v. 61 (3), 195-200.

BAIRD, C.; CANN, M. *Química Ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BENITEZ-NELSON, C. R. 2000. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems. *Earth Science*, 51, 109–135. doi:10.1016/S0012-8252(00)00018-0.

BURFORD M. A.; ROTH LISBERG, P. C. 1999. Factors limiting phytoplankton production in a tropical continental shelf ecosystem. *Est. Coas. Shelf Sci.*, 48: 541-549.

BURNETT, W. C. & DULAIIOVA, H. 2003. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*. v. 69(1-2), 21-35.

BURNETT, W. C. et al., 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the Total Environment*. v. 367 (2–3), 498–543.

CARMOUZE, J. P. *O metabolismo dos ecossistemas aquáticos - Fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas*: Editora FAPESP. 1994. 253 p.

CHARETTE, M. A. & SHOLKOVITZ, E. R. 2002. Oxidative precipitation of groundwater-derived ferrous iron in the subterranean estuary of a coastal bay. *Geophysical Research Letters*. v. 29 (10), 85-100.

CHARETTE, M. A.; SHOLKOVITZ, E. R. 2006. Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 2. Geochemistry of the pore water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. v. 70, 811–826.

CHARETTE, M. A.; SPLIVALLO, R.; HERBOLD, C.; BOLLINGER, M. S.; MOORE, W. S. 2003. Salt marsh submarine groundwater discharge as traced by radium isotopes. *Mar. Chem.* v. 84 (1-2), 113-121.

DARCY, H.; LES FONTAINES. *Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris, 1856.

- DREVER, J. I. *The Geochemistry of Natural Waters: surface and groundwater environments*. 3rd ed., 1997, p. 436.
- ESTEVEZ, F. A. 1950. *Fundamentos de limnologia*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- FETTER, C. W. 2001. *Applies Hydrogeology*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- KIM, G.; RYU, J. W.; YANG, H. S.; YUN, S. T. 2005. Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by Ra-228 and Ra-226 isotopes: Implications for global silicate fluxes. *Earth Planet. Sci. Letts*. v. 237 (1-2), 156-166.
- KROEGER, K. D.; SWARZENSKI, P. W.; GREENWOOD, W. J.; REICH, C. 2007. Submarine groundwater discharge to Tampa Bay: Nutrient fluxes and biogeochemistry of the coastal aquifer. *Marine Chemistry*. v. 104, 85–97.
- LIMA, K. C. Estimativa de descarga de água subterrânea para a região costeira do município de Mostardas (RS). 2014. 51p. Monografia (Graduação em Oceanologia), Universidade Federam do Rio Grande, Rio Grande. 2014.
- MOORE, W. S. 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226Ra enrichments. *Nature*, 380: 2.
- NIENCHESKI, L. F. H., WINDOM, H. L., MOORE, W. S.; JAHNKE, R. A. 2007. Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil. *Mar. Chem.* v. 106 (3-4), 546-561.
- PAIVA, M. L. *Sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani: relação com a oceanografia*. 2013. 79p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 2013.
- REDFIELD, A. C.; KETCHUM, B. H.; RICHARDS, F. A. 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. *The Sea*. M. N. Hill. New York, Interscience Pub. v.2, 26-77.
- RUTTENBERG, K.C. 2005. The Global Phosphorus Cycle, in: Schlesinger, W.H. (ed), *Treatise of Biogeochemistry*, Elsevier, 8: 585-643. doi:10.1016/B0-08-043751-6/08153-6.
- SANTOS, I. R.; BURNETT, W. C.; DITTMAR, T.; SURYAPUTRA, I. G. N. A.; CHANTON, J. 2009. Tidal pumping drives nutrient and dissolved organic matter dynamics in a Gulf of Mexico subterranean estuary. *Geochim. Cosmochim. Acta*. v. 73(5), 1325-1339.
- SLOMP, C. P. & VAN CAPPELLEN, P. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *Journal of Hydrology*. v. 295 (1-4), 64 - 86.
- SONG, J. M. 2010. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas. *Springer, Berlin Heidelberg*, 676p. doi: 10.1007/978-3-642-04060-3.

WINDOM, H., MOORE, W. S., NIENCHESKI, L. F., JAHNKE, R. 2006. Submarine groundwater discharge: a large, previously unrecognized source of dissolved iron to the South Atlantic Ocean. *Mar. Chem.* v. 102, 252 - 266.

ZABEL, M.; DAHMKE, A.; SCHULZ, H. D. 1998. Regional distribution of diffusive phosphate and silicate fluxes through the sediment-water interface: the eastern south Atlantic. *Deep-Sea Research Part I*, 45, 277–300. doi:10.1016/S0967-0637(97)00073-3.

ZHUANG, W.; GAO, X.; ZHANG, Y.; XING, Q.; TOSI, L.; QIN, S. 2014. Geochemical characteristics of phosphorus in surface sediments of two major Chinese mariculture areas: The Laizhou Bay and the coastal Waters of the Zhangzi Island. *Marine Pollution Bulletin*, 83: 343-351. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.03.040.

ANEXO: DADOS DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DOS POÇOS PERMANENTES DISTRIBUÍDOS PELA BARREIRA ARENOSA DA LAGOA DOS PATOS (RS), BRASIL

Tabela 8: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 1 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P1	5	nov/03			2,91	616,11	70,94	0,13	2,49
P1	5	jan/04	690,00	7,38	2,47	1302,22	24,66	0,19	3,18
P1	5	mar/04	517,00	7,04	3,09	1301,88	32,66	0,21	1,01
P1	5	jul/04	163,50	6,51	7,60	895,53	21,32	0,17	2,22
P1	5	out/04	170,00	6,80	8,25	460,06	19,74	0,10	0,04
P1	5	dez/04	575,00	6,51	5,27	1229,86	22,46	0,36	0,06
P1	5	fev/05	628,00	6,58	4,29	680,72	18,63	0,38	
P1	5	jul/05	537,00	6,46	3,10	1429,39	2,27	0,33	0,29
P1	5	jul/06	578,00	7,13	4,51	1423,20	17,92	0,32	0,65
P1	5	nov/06			4,69	38,99	14,46	0,31	16,59
P1	5	jul/07	551,00	7,55	3,22	756,23	34,89	0,11	4,28
P1	5	dez/07	447,50	7,48	3,79	701,21	24,60	7,97	17,64
P1	5	fev/09	523,00	7,00	2,29	1678,65	22,73	0,20	0,63
P1	5	dez/11	533,00	7,32	3,96	140,47	39,03	0,19	6,31
P1	5	dez/12	511,00	7,01	5,56	363,97	22,06	0,05	0,38
P1	10	nov/03			3,51	983,91	32,06	0,11	3,70

P1	10	jan/04	533,00	7,52	5,25	1767,01	11,91	0,15	2,30
P1	10	mar/04	620,00	7,12	5,02	1821,79	26,97	0,24	0,82
P1	10	jul/04	572,00	6,57	6,10	328,29	24,67	0,23	0,84
P1	10	out/04	585,00	7,07	6,01	566,60	2,77	0,17	0,01
P1	10	dez/04	541,00	6,80	3,91	1357,15	17,31	0,20	0,27
P1	10	fev/05	616,00	6,89	4,11	1378,99	17,93	0,18	
P1	10	jul/05	527,00	6,62	5,71	1254,79	23,99	0,17	0,18
P1	10	jul/06	620,00	7,23	6,31	423,80	18,96	0,14	0,63
P1	10	nov/06			3,54	31,34	22,34	0,05	1,88
P1	10	jul/07	541,00	7,67	3,29	890,21	38,94	0,11	6,38
P1	10	dez/07	440,70	7,80	4,27	849,07	29,22	3,27	6,73
P1	10	fev/09	516,00	7,24	2,51	1884,63	15,27	0,20	1,03
P1	10	jul/10			0,60	713,34	25,71	0,11	5,70
P1	10	abr/11	506,00	7,59	0,54	717,00	26,00	0,14	5,63
P1	10	dez/11	547,00	7,56	4,67	122,21	32,29	0,10	2,11
P1	10	dez/12	639,00	7,16	5,43	557,75	23,62	0,08	3,83
P1	15	nov/03			2,87	736,06		1,26	8,22
P1	15	jan/04	927,00	7,30	4,94	1512,12	7,93	0,14	2,30
P1	15	mar/04	942,00	7,17	5,70	1435,06	17,04	0,14	0,35
P1	15	jul/04	967,00	6,83	6,15	693,74	29,02	0,10	0,65
P1	15	out/04	966,00	6,86	5,65	544,89	0,53	0,12	8,09
P1	15	dez/04	982,00	6,89	5,49	1072,07	23,25	0,12	0,15
P1	15	fev/05	1063,00	6,95	4,50	1229,53	16,99	0,19	0,14
P1	15	jul/05	964,00	6,70	5,67	1213,71	25,90	0,21	0,15
P1	15	jul/06	1006,00	7,29	5,22	939,51	0,71	0,20	0,45
P1	15	nov/06			2,71	754,88	15,46	0,01	1,10

P1	15	jul/07	952,00	7,56	2,06	871,48	16,15	0,11	47,45
P1	15	dez/07	760,00	7,80	3,49	852,65	21,06	12,14	13,16
P1	15	fev/09	513,00	7,25	2,90	2135,55	14,80	0,18	1,40
P1	15	abr/11	893,00	7,61	0,68	135,78	37,86	0,07	5,32
P1	15	dez/11	870,00	7,50	8,70	111,06	38,05	0,11	1,30
P1	15	dez/12	851,00	7,16	12,89	234,01	12,86	0,02	1,11

Tabela 9: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 2 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P2	5	nov/03			0,32	228,07	66,27	0,55	1,80
P2	5	jan/04	171,20	6,12	0,74	176,60	4,59	0,15	1,37
P2	5	mar/04	173,00	5,81	0,81	157,55	5,37	0,27	0,24
P2	5	jul/04	175,00	5,42	0,59	559,93	1,85	0,07	0,36
P2	5	out/04	170,50	5,35	0,32	138,64	22,74	0,14	0,24
P2	5	dez/04	174,70	5,76	0,22	1054,19	2,88	0,23	0,83
P2	5	fev/05	242,30	5,42	0,31	282,83	2,28	0,23	0,63
P2	5	jul/05	182,20	5,57	0,24	332,77	1,69	0,19	1,25
P2	5	jul/06	491,00	5,85	3,37	323,97	4,92	2,39	51,25
P2	5	nov/06			0,80	752,44	3,58	0,17	6,36
P2	5	jul/07	125,30	7,06	6,39	24,76	21,89	0,59	1,74
P2	5	dez/07	151,50	6,70	4,30	265,28	56,62	9,16	6,55
P2	5	fev/09	205,00	5,84	3,77	69,07	15,57	0,36	2,70
P2	5	dez/11	1017,00	6,21	3,61	126,27	1,80	0,50	1,55
P2	10	nov/03			0,28	225,55	5,95	0,10	6,01
P2	10	jan/04	188,20	5,95	0,51	444,02	4,04	0,18	1,93
P2	10	mar/04	191,90	5,84	0,39	190,95	6,89	0,15	0,34
P2	10	jul/04	197,50	5,52	0,46	408,45	4,15	0,10	0,32
P2	10	out/04	179,00	5,37	5,72	158,08	72,69	0,16	0,10
P2	10	dez/04	202,50	5,35	1,40	233,17	5,57	0,22	0,34
P2	10	fev/05	213,20	5,61	0,27	336,35	1,67	0,18	0,90
P2	10	jul/05	210,80	5,74	0,29	518,70	3,07	0,18	0,36

P2	10	jul/06	251,40	6,17	13,32	2050,39	423,80	0,30	1,17
P2	10	nov/06			0,48	639,64	5,35	0,01	0,99
P2	10	jul/07	206,00	6,57	1,08	156,25	3,84	0,13	14,20
P2	10	dez/07	167,20	6,57	0,64	201,92	9,24	3,72	4,77
P2	10	fev/09	19,00	5,79	1,18	104,28	0,87	0,14	1,51
P2	10	jul/10			0,44	8,90	15,57	0,26	1,92
P2	10	abr/11	182,60	6,28	0,42	8,83	15,52	0,25	1,87
P2	10	dez/12	192,90	5,97	1,47	129,07	7,05	0,27	20,33
P2	15	nov/03			0,20	335,27	0,00	0,35	2,34
P2	15	jan/04	208,00	6,01	0,72	648,30	4,83	0,70	0,85
P2	15	mar/04	210,60	5,25	0,34	614,13	9,94	1,64	
P2	15	jul/04	215,50	5,58	0,48	1019,24	9,05	0,58	
P2	15	out/04	103,30	6,02	28,78	79,81	15,30	1,18	2,46
P2	15	dez/04	139,90	5,63	4,60	342,15	114,62	0,61	0,04
P2	15	fev/05	234,00	5,62	2,74	389,37	20,65	0,59	0,23
P2	15	jul/05	125,50	5,58	0,58	624,70	10,18	0,47	0,55
P2	15	jul/06	171,70	6,28	3,68	617,83	22,72	0,55	1,92
P2	15	nov/06			1,32	105,04	111,56	0,25	0,41
P2	15	jul/07	100,50	6,72	0,78	226,12	79,04	2,26	31,06
P2	15	dez/07	151,80	6,62	1,38	166,13	46,30		29,59
P2	15	fev/09	206,00	5,80	1,41	134,70	3,83	1,00	1,49
P2	15	abr/11	199,30	6,34	0,24	49,21	3,64	0,72	12,90
P2	15	dez/11	194,30	6,48	27,78	113,42	39,74	1,26	0,93
P2	15	dez/12	273,00	6,06	26,38	206,28	125,50	1,42	3,23

Tabela 10: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 3 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P3	5	nov/03			0,90	454,07	17,15	0,19	4,35
P3	5	jan/04	163,40	7,08	1,80	801,04	5,78	0,28	1,26
P3	5	mar/04	180,00	7,01	3,41	846,69	3,31	0,28	0,23
P3	5	jul/04	169,40	6,68	3,74	573,82	17,03	0,26	0,58
P3	5	out/04	187,10	5,83	3,13	301,98	13,15	0,38	0,18
P3	5	dez/04	192,90	6,17	2,35	581,87	16,23	0,39	0,93
P3	5	fev/05	243,70	5,99	2,72	712,92	5,47	0,33	0,56
P3	5	jul/05	200,90	6,02	2,14	723,29	16,02	0,31	0,87
P3	5	jul/06	176,80	6,64	3,28	1063,93	8,85	0,24	27,39
P3	5	nov/06			0,42	111,55	14,18	0,02	1,13
P3	5	dez/07	164,70	6,91	2,07	514,27	18,97	5,65	5,04
P3	5	fev/09	167,00	6,59	1,06	502,03	8,77	0,32	5,11
P3	5	dez/11	163,50	7,03	1,07	116,80	1,09	0,01	1,56
P3	5	dez/12	169,00	6,67	2,96	251,98		0,72	0,63
P3	10	nov/03			0,50	680,89	14,76	0,20	4,53
P3	10	jan/04	160,00	7,03	4,76	980,96	3,53	0,57	4,90
P3	10	mar/04	163,10	6,59	2,22	1008,22	16,25	0,51	
P3	10	jul/04	166,60	6,78	10,55	1258,27	25,89	0,41	1,37
P3	10	out/04	163,10	5,93	9,70	325,97	16,91	0,50	0,17
P3	10	dez/04	176,60	5,93	7,06	835,39	13,49	0,65	0,01

P3	10	fev/05	180,30	6,27	10,01	834,19	10,55	0,72	0,30
P3	10	jul/05	190,00	6,19	10,05	860,10	16,02	0,72	0,07
P3	10	jul/06	170,60	6,76	11,06	1235,31	10,24	0,37	0,83
P3	10	nov/06			0,39	275,60	13,79	0,04	0,53
P3	10	dez/07	115,00	7,29	8,94	562,73	17,39	7,74	1,78
P3	10	jul/10	129,00	6,43	5,46	383,72	7,20	0,90	1,15
P3	10	dez/11	208,00	6,92	1,11	102,27	8,98	0,01	
P3	10	dez/12	1078,00	7,70	10,12	332,86	9,15	0,60	
P3	15	nov/03			2,06	549,95	22,16	0,25	3,59
P3	15	jan/04	181,30	6,72	3,83	1064,36	13,72	0,67	0,81
P3	15	mar/04	189,60	6,53	3,71	1080,10	18,97	0,61	
P3	15	jul/04	198,60	6,27	7,01	371,84	21,99	0,59	0,32
P3	15	out/04	196,00	6,48	3,23	340,36	0,39	0,51	0,07
P3	15	dez/04	193,50	6,49	6,07	872,20	14,82	0,47	0,08
P3	15	fev/05	217,90	6,12	6,29	886,96	15,38	0,80	0,23
P3	15	jul/05	202,50	6,12	0,25	718,36	18,56	0,79	0,13
P3	15	jul/06	200,00	6,62	5,58	1107,13	16,13	0,67	14,32
P3	15	nov/06			0,16	348,23	16,84	0,03	0,41
P3	15	jul/07	149,90		0,42	491,16	6,45		
P3	15	fev/09	185,00	6,38	2,59		11,97	1,43	6,01
P3	15	dez/11	274,00		0,50	92,12	19,71	0,34	2,39
P3	15	dez/12	167,00	6,70	7,69	298,99	18,94	0,82	1,59

Tabela 11: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 4 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P4	5	nov/03			0,21	497,64	10,93	0,09	24,32
P4	5	jan/04	286,00	5,84	0,16	697,03	1,14	0,26	7,24
P4	5	mar/04	307,80	6,27	0,36	729,99	4,42	0,13	38,11
P4	5	jul/04	208,00	5,55	0,62	553,62	5,07	0,08	30,55
P4	5	out/04	117,00	5,54	0,39	264,37		0,31	47,54
P4	5	dez/04	223,90	4,74	0,24	712,07	2,37	0,34	19,91
P4	5	fev/05	125,50	5,52	0,18	11,79	1,98	0,18	13,95
P4	5	jul/05	120,90	5,53	0,46	660,44	4,46	0,18	29,13
P4	5	jul/06	123,60	5,99	0,65	739,06	0,42	0,13	0,60
P4	5	nov/06			0,57	51,35	2,64	0,03	52,81
P4	5	jul/07		6,22	0,54	500,57	2,14	0,09	33,48
P4	5	dez/07	80,20	6,45	0,35	451,65	6,96	3,27	47,83
P4	5	fev/09	100,00	5,56	0,27	108,51	1,83	0,15	33,40
P4	5	jul/10			0,16	31,32	4,35	0,15	31,69
P4	5	abr/11	102,90	6,21	0,16	31,32	4,35	0,15	31,69
P4	5	dez/11		5,64	1,71	93,81	1,45	0,07	9,58
P4	5	dez/12	78,60	5,62	0,80	140,00	4,63	0,13	30,93
P4	10	nov/03			0,29	411,64	9,18	0,24	30,46
P4	10	jan/04	112,00	5,76	0,19	724,20	0,26	0,56	5,19
P4	10	mar/04	155,30	5,73	0,26	764,66	8,38	2,81	25,76
P4	10	jul/04	114,60	5,24	0,32	618,00	3,21	0,12	19,93
P4	10	out/04	112,60	5,13	0,36	314,10		0,07	30,62

P4	10	dez/04	114,00	5,40	0,48	265,15	1,78	0,13	19,52
P4	10	fev/05	113,20	5,12	0,17	11,63	2,00	0,18	19,09
P4	10	jul/05	115,60	5,39	0,28	596,35	1,23	0,16	29,17
P4	10	jul/06	118,20	5,68	0,18	1143,33	0,30	0,11	47,99
P4	10	nov/06			0,19	59,98	2,25	0,04	36,88
P4	10	jul/07		6,06	0,17	406,93	0,85	0,16	30,34
P4	10	dez/07	99,90	6,21	0,30	535,89	7,34	2,82	31,68
P4	10	fev/09	107,00	5,59	0,24	70,76	0,73	0,14	19,39
P4	10	dez/11	301,00	5,67	1,71	93,81	0,56	0,13	13,97
P4	10	dez/12	108,00	5,47	0,52	108,20	0,22		25,23
P4	15	nov/03			0,25	576,25	9,64	0,73	6,20
P4	15	jan/04	116,40	6,00	0,39	1714,53	5,30	0,36	4,56
P4	15	mar/04	120,10	5,61	0,30	1086,86	7,63	0,23	20,51
P4	15	jul/04	125,60	5,35	0,51	814,92	1,13	0,24	26,09
P4	15	out/04	122,00	5,28	0,38	465,62	1,27	0,22	19,96
P4	15	dez/04	123,20	5,10	5,38	520,20	44,20	0,13	2,53
P4	15	fev/05	131,30	5,37	0,21		2,47	0,18	6,41
P4	15	jul/05	126,40	5,40	0,35	1110,22	0,88	0,15	23,87
P4	15	jul/06	126,00	5,89	0,39	1383,20	0,30	0,20	20,48
P4	15	nov/06			0,21	46,80	2,14	0,00	29,62
P4	15	jul/07	103,30	6,30	0,17	301,04		0,16	41,83
P4	15	dez/07	112,50	6,42	0,38	508,31	3,86	3,72	26,50
P4	15	fev/09	114,00	5,66	0,45	197,52	0,87	0,18	18,98
P4	15	abr/11	116,00	6,19	0,21		6,44	0,11	38,27
P4	15	dez/11	129,50	6,11	1,71	93,81	0,91	0,18	11,78
P4	15	dez/12	123,90	5,78	0,89	437,93	4,26	0,22	32,63

Tabela 12: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 5 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P5	5	nov/03			0,43	320,59	9,48	0,25	9,64
P5	5	jan/04	246,10	6,01	0,52	318,10	6,90	0,28	5,20
P5	5	mar/04	252,60	5,94	0,56	457,69	12,79	0,34	0,30
P5	5	jul/04	3136,00	5,54	0,80	830,70	3,65	0,29	9,64
P5	5	out/04	256,00	5,31	1,21	204,53	2,71	0,30	6,39
P5	5	dez/04	242,20	5,27	0,76	873,65	3,45	0,31	17,47
P5	5	fev/05	289,00	5,33	0,26	260,12	2,34	0,24	14,36
P5	5	jul/05	224,50	5,46	0,48	378,78	3,54	0,22	14,62
P5	5	jul/06	296,40	5,86	0,59		0,36	0,22	14,56
P5	5	nov/06			0,18	54,93	3,75	0,36	4,53
P5	5	jul/07	355,00	6,30	0,05	95,02	4,90	0,38	8,40
P5	5	dez/07	467,00	6,54	0,47	171,35	9,11	2,90	15,19
P5	5	fev/09	341,00	5,50	0,65	91,32	2,60	1,17	14,65
P5	5	jul/10			0,15	43,74	6,44	0,38	6,20
P5	5	abr/11	289,00	5,89	0,15	43,74	6,44	0,38	6,20
P5	5	dez/11		5,60	8,55	93,81	36,10	1,46	4,13
P5	5	dez/12	371,00	5,58	1,15	155,89	85,21	1,04	11,38
P5	10	nov/03			0,37	276,49	16,16	0,29	18,50
P5	10	jan/04	140,40	6,38	0,84	1137,45	1,62	0,32	3,68
P5	10	mar/04	146,60	5,79	0,49	1147,54	9,45	0,38	0,07

P5	10	jul/04	128,50	5,00	0,95	717,72	7,25	0,47	11,48
P5	10	out/04	154,40	5,37	6,64	461,07	11,65	0,51	6,44
P5	10	dez/04	143,70	5,30	0,76	748,26	3,64	0,47	14,44
P5	10	fev/05	153,00	5,32	0,42	1010,07	6,92	0,20	14,92
P5	10	jul/05	147,20	5,54	0,59	803,60	18,79	0,31	11,75
P5	10	jul/06	179,60	6,10	0,88	8,10	0,71	0,22	12,43
P5	10	nov/06			1,36	56,72	0,25	0,06	4,32
P5	10	jul/07	167,50	6,47					
P5	10	dez/07	465,00	6,42	0,46	368,90	15,88	2,60	11,02
P5	10	fev/09	133,00	5,70	0,40	73,58	1,13	1,62	13,09
P5	10	jul/10			0,18	65,89	11,23	0,15	6,14
P5	10	abr/11	112,90	6,08	0,14	66,47	11,14	0,16	6,03
P5	10	dez/11		6,00	1,71	93,81	29,99	0,49	4,29
P5	10	dez/12	133,20	5,75	1,05	185,62	5,98	0,57	8,73
P5	15	nov/03			0,28	394,79		0,47	15,96
P5	15	jan/04	184,20	6,31	1,09	1049,36	5,85	0,39	3,50
P5	15	mar/04	130,60	5,81	0,86	1022,94	14,81	0,25	0,23
P5	15	jul/04	166,00	5,69	1,00	1110,96	11,30	0,29	0,61
P5	15	out/04	144,20	5,43	5,94	321,93	16,26	0,35	3,67
P5	15	dez/04	122,90	5,92	0,91	997,36	13,49	0,30	1,87
P5	15	fev/05	131,30	5,41	0,57	868,44	11,66	0,28	8,58
P5	15	jul/05	124,00	5,69	0,83	796,01	12,26	0,25	9,72
P5	15	jul/06	148,40	5,85	0,58	1109,12		0,41	9,21
P5	15	nov/06			0,31	34,43	3,47	0,04	33,19
P5	15	jul/07	134,50	6,46	0,13	87,77	52,62	0,13	8,68
P5	15	dez/07			0,66	515,76	7,59	2,82	10,73

P5	15	fev/09	123,00	5,70	0,49	117,80	1,57	0,56	12,30
P5	15	abr/11	123,30	6,14	0,20	51,08	6,33	0,17	2,70
P5	15	dez/11		5,96	1,71	93,81	24,67	0,40	3,59
P5	15	dez/12	162,70	5,54	0,24	309,36	2,32	1,65	10,64

Tabela 13: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 6 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P6	5	nov/03			5,26	457,08	9,48	0,35	12,74
P6	5	jan/04	901,00	7,07	5,98	1069,04		0,10	2,21
P6	5	mar/04	1015,00	7,31	6,83	1017,15	18,48	0,25	0,88
P6	5	jul/04	1653,00	7,48	21,32	496,18	9,80	0,09	2,54
P6	5	out/04	1258,00	7,58	12,18	342,38	94,36	0,44	0,82
P6	5	dez/04	877,00	6,70	2,25	846,72	30,38	0,21	0,38
P6	5	fev/05	977,00	6,78	9,94	872,14	49,97	0,16	2,06
P6	5	jul/05	730,00	6,77	10,00	841,61	32,83	0,16	4,36
P6	5	jul/06	589,00	7,47	9,99	1043,59	34,62	0,11	1,12
P6	5	nov/06			2,08	183,48	30,39	0,02	0,85
P6	5	dez/07	795,00	7,84	7,23	570,18	74,39	14,45	

P6	5	fev/09	326,00	6,40	0,99	469,49	0,13	0,15	16,38
P6	10	nov/03			2,57	318,20	16,16	0,21	4,65
P6	10	jan/04	1014,00	7,03	2,36	1082,16	19,04	0,20	1,12
P6	10	mar/04	841,00	7,10	5,57	1112,75	11,30	0,29	0,24
P6	10	jul/04	803,00	6,85	4,80	668,49	16,64	0,12	10,16
P6	10	out/04	728,00	7,02	4,61	630,73	46,71	0,13	0,25
P6	10	dez/04	754,00	6,57	3,95	689,35	57,44	0,08	0,16
P6	10	fev/05	799,00	6,27	3,08	753,65	52,91	0,13	1,50
P6	10	jul/05	749,00	6,66	3,86	850,24	28,21	0,13	0,36
P6	10	jul/06	216,00	7,21	3,06	1023,26	38,84	0,11	0,28
P6	10	nov/06			1,70	21,61	38,10	0,02	2,37
P6	10	dez/07	880,00	7,48	2,39	463,58	61,67		3,17
P6	10	fev/09	586,00	6,40	1,49	684,42		0,12	34,98
P6	15	nov/03			1,40	396,15		0,20	30,78
P6	15	jan/04	1011,00	7,63	5,44	1143,07	3,16	0,13	3,29
P6	15	mar/04	902,00	7,76	6,17	1094,35	25,57	0,13	0,72
P6	15	jul/04	861,00	6,90	7,03	876,77	31,51	0,07	10,10
P6	15	out/04	813,00	7,39	6,25	306,28	33,15	0,10	0,15
P6	15	dez/04	897,00	7,14	5,93	818,11	34,76	0,10	0,06
P6	15	fev/05	969,00	6,87	5,27	879,55	29,20	0,10	1,09
P6	15	jul/05	850,00	6,99	6,01	1081,07	24,63	0,07	0,22
P6	15	jul/06	757,00	7,64	6,06	1429,22	29,25	0,18	0,17
P6	15	nov/06			4,57	556,50	31,66	0,04	0,40
P6	15	dez/07	1150,00	7,13	4,22	450,16	41,00	10,87	4,61
P6	15	fev/09	477,00	6,30	10,12	518,79		0,29	53,20

Tabela 14: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 7 nas três profundidades de coleta (5, 10 e 15 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P7	5	jan/04	186,00	6,23	0,86	281,78	7,52	0,36	2,92
P7	5	mar/04	105,30	5,68	0,48	885,23	3,64	0,24	17,47
P7	5	jul/04	51,20	5,76	1,87	703,20	4,57	0,06	16,37
P7	5	dez/04	47,90	4,85	1,23	818,95	0,87	0,13	16,07
P7	5	fev/05	54,80	5,70	1,08	284,35	2,01	0,09	13,49
P7	5	jul/05	47,90	5,45	0,93	593,88	2,03	0,09	14,36
P7	5	jul/06	720,00	5,90	1,08	617,30	0,53	0,08	26,22
P7	5	nov/06			0,64	643,61	3,47	0,00	19,72
P7	5	jul/07	82,80	5,96	1,36	71,82	10,29	0,15	24,45
P7	5	dez/07	241,00	6,39	1,66	284,66	8,92	4,61	3,64
P7	5	fev/09		5,15	2,58	104,85	5,53	1,44	36,75
P7	5	jul/10			0,20	16,20	3,53	0,07	11,55
P7	5	abr/11	61,00	6,06	0,20	16,20	3,53	0,07	11,55
P7	5	dez/11		5,64	1,71	93,81	1,53	1,56	9,68
P7	5	dez/12	123,40	5,75	1,20	198,75	3,50	0,12	34,28
P7	10	nov/03			0,79	888,30	12,97	0,16	2,42
P7	10	jan/04	428,00	7,26	4,10	975,33	7,89	0,14	1,94
P7	10	mar/04	460,00	6,99	3,40	1270,04	4,17	0,10	0,53
P7	10	jul/04	480,80	7,74	4,52	689,32	3,93	0,09	12,12
P7	10	out/04	464,30	7,38	3,55	363,84	1,69	0,08	0,60

P7	10	dez/04	440,70	6,83	3,25	531,14	2,60	0,14	0,24
P7	10	fev/05	468,20	6,94	3,73	927,69	5,19	0,07	1,19
P7	10	jul/05	458,00	7,08	3,14	1008,88	4,11	0,06	0,75
P7	10	jul/06	300,00	7,37	4,52	926,10	1,86	0,14	0,78
P7	10	nov/06			1,90	665,80	4,13	0,00	0,59
P7	10	jul/07	484,00	7,73	1,41	76,63	5,13	0,09	1,91
P7	10	dez/07	556,00	7,86	2,86	520,23	8,98	3,42	2,67
P7	10	fev/09	472,00	7,40	2,97	1417,94	6,63	0,28	9,13
P7	10	abr/11	945,00	7,38	2,19	7,41	36,66	0,28	3,88
P7	10	dez/11		7,45	1,71	93,81	4,37	0,55	5,42
P7	10	dez/12	127,30	5,69	4,75	377,79	10,49	0,08	0,62
P7	15	nov/03			1,05	987,87		0,25	26,94
P7	15	jan/04	375,00	7,40	3,14	1853,21	13,18	0,12	0,99
P7	15	mar/04	393,90	7,14	3,17	1752,78	15,39	0,08	2,03
P7	15	jul/04	398,40	7,55	3,49	1073,94	14,48	0,10	0,67
P7	15	out/04	391,20	7,31	3,45	319,66	11,96	0,11	0,68
P7	15	dez/04	381,40	6,51	2,60	1321,38	8,88	0,10	0,08
P7	15	fev/05	418,00	6,60	2,92	1162,82	11,19	0,07	1,06
P7	15	jul/05	417,10	6,45	2,93	1147,80	16,08	0,06	0,26
P7	15	fev/09	431,00	7,57	2,73	1506,54	11,57	0,09	16,39
P7	15	abr/11	371,00	7,70	0,51	125,76	22,26	0,05	15,23
P7	15	dez/11		7,60	1,71	93,81	0,91	0,66	7,30
P7	15	dez/12	401,00	7,16	2,90	372,26	4,09	0,28	13,28

Tabela 15: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 8 na profundidades de coleta de 10 metros.

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P8	10	nov/03			0,63	608,49	0,00	0,17	3,92
P8	10	jan/04	242,70	5,49	0,35	220,17	3,53	0,09	5,42
P8	10	mar/04	114,00	5,27	0,27	576,93	18,73	0,09	2,18
P8	10	jul/04	116,40	5,02	0,34	437,48	3,54	0,08	12,12
P8	10	out/04	158,00	5,22	0,60	325,97	0,62	0,12	25,71
P8	10	dez/04	143,00	5,21	0,20	677,60	3,08	0,17	15,18
P8	10	fev/05	211,90	4,68	0,04	99,82	2,70	0,29	26,01
P8	10	jul/05	142,20	5,13	0,12	729,46	1,05	0,24	30,62
P8	10	jul/06	332,00	5,65	0,20	729,46	2,44	0,16	28,03
P8	10	nov/06			0,15	236,55	2,25	0,15	69,56
P8	10	jul/07	166,70	5,79	0,09	26,49	0,62	0,13	49,45
P8	10	fev/09	118,00	5,46	0,87	58,37	0,60	0,15	47,36
P8	10	abr/11	137,00	5,61	0,23	7,47	3,37	0,12	34,76
P8	10	dez/11		5,67	1,71	93,81	3,40	0,21	12,43
P8	10	dez/12	126,30	5,58	1,07	65,48	1,24	0,14	54,97

Tabela 16: Dados dos parâmetros físicos e químicos (Condutividade, pH e nutrientes inorgânicos dissolvidos) referentes ao poço 9 nas três profundidades de coleta (11, 15 e 27 metros).

Poços	Profundidade (m)	Data	Condutividade (uS)	pH	PO4 (µM)	SiO4 (µM)	NH4 (µM)	NO2 (µM)	NO3 (µM)
P9	11	nov/03			4,24	531,83	25,46	0,99	6,59
P9	11	jan/04	2823,00	7,71	6,35	667,04	18,56	1,63	0,21
P9	11	mar/04	4879,00	7,50	5,77	659,80		1,03	6,19
P9	11	jul/04	3087,00	7,11	11,00	652,08	149,53	1,31	0,21
P9	11	out/04	2224,00	8,01	49,30	258,56	17,51	1,33	
P9	11	dez/04	2699,00	7,61	68,30	809,09	19,12	0,00	0,40
P9	11	fev/05	3568,00	7,44	54,98	592,58	61,44	0,54	1,12
P9	11	jul/05	3445,00	6,70	23,39	469,40	16,60	0,02	0,15
P9	11	jan/06	9060,00	7,67	25,37	469,40	26,65	0,63	6,27
P9	11	nov/06			2,22	213,70	66,08	0,15	2,57
P9	11	jul/07	50400,00	7,74	2,84	454,47	92,74	0,17	0,74
P9	11	dez/07	29450,00	8,01	19,68	352,50	82,97	14,60	
P9	11	fev/09	236000,00	7,89	5,14	840,34		0,96	0,25
P9	11	jul/10			0,60	57,83	4,57	0,20	12,32
P9	11	abr/11	11400,00	7,91	0,60	57,83	4,57	0,20	12,32
P9	11	dez/11	358000,00	7,39	3,42	93,81	52,59	2,47	4,21
P9	11	dez/12	39100,00	7,30	23,57	162,81	48,91	0,67	1,77
P9	15	nov/03			0,93	419,30	36,04	0,20	2,23
P9	15	jan/04	63800,00	7,04	4,41	775,74		2,37	2,57
P9	15	mar/04	79200,00	7,20	6,32	835,70	114,04	2,45	8,65

P9	15	jul/04	74000,00	7,08	54,13	530,90	170,44	2,76	4,68
P9	15	out/04	72900,00	7,02	0,75	211,85	65,05	2,19	
P9	15	dez/04	80300,00	7,07	4,18	690,22	92,10	1,94	3,74
P9	15	fev/05	72000,00	7,13	5,18	508,34	86,98	2,73	9,40
P9	15	jul/05	81000,00	6,49	5,06	402,85	38,55	2,60	5,62
P9	15	jan/06	70490,00	6,84	5,90	402,85	41,15	0,25	0,65
P9	15	nov/06			0,51	393,70	88,33	1,17	
P9	15	jul/07	82900,00	7,28	0,37	339,22	105,55	0,31	14,37
P9	15	dez/07	71000,00	7,57	3,94	336,10	19,17	44,05	
P9	15	fev/09	78600,00	7,04	3,45	1038,08		2,60	14,17
P9	15	abr/11	70300,00	7,21	0,23	87,02	37,48	0,18	5,59
P9	15	dez/11	79200,00	7,02	6,84	93,81	46,65	1,47	12,10
P9	15	dez/12	72100,00	6,78	1,92	172,49	24,16	20,90	23,29
P9	27	nov/03			1,30	432,09		0,18	2,19
P9	27	jan/04	22960,00	7,26	2,18	808,54		0,48	2,30
P9	27	mar/04	40100,00	7,10	2,64	1082,63	74,46	0,33	1,06
P9	27	jul/04	41030,00	7,26	2,30	547,94	85,15	0,38	0,97
P9	27	out/04	38350,00	7,11	1,75	300,97	123,44	0,40	0,01
P9	27	dez/04	38460,00	7,02	1,62	796,47	113,29	0,64	1,69
P9	27	fev/05	36600,00	7,27	1,94	768,47	86,98	0,48	1,02
P9	27	jul/05	39810,00	6,61	1,78	466,94	28,90	0,45	0,18
P9	27	jan/06	31960,00	7,00	2,42	466,94	59,54	0,56	10,56
P9	27	nov/06			0,34	23,04	71,87	0,06	0,46
P9	27	jul/07	42700,00	7,45	0,20	265,74	77,45	0,15	1,09
P9	27	dez/07	36840,00	7,74	2,51	436,74	21,09	9,08	
P9	27	fev/09	40350,00	7,09	1,84	1131,04	59,87	0,26	3,46

P9	27	jul/10			0,29	85,25	9,61	0,14	56,62
P9	27	abr/11	33200,00	7,27	0,29	85,25	9,61	0,14	56,62
P9	27	dez/11	37100,00	7,15	8,55	93,81	33,80	0,19	4,74
P9	27	dez/12	38900,00	6,93	2,24	225,02	74,40	0,35	1,72
