

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS CARACTERIZADORES DAS INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS EM UMA BACIA COSTEIRA

Vinícius Adriano Bento Ferreira¹ ; Priscilla Kern²; Patricia Kazue Uda³ & Davide Franco⁴

Abstract: Despite several hydrological studies carried out in coastal river basins, groundwater flows in these areas have been overlooked due to the invisibility of groundwater discharges (GWD). Thus, this study analyzed Lagoa da Conceição, a coastal lagoon in Santa Catarina state, a local of significant ecological, landscape and economic importance. The aim of this study was to analyze the interactions between groundwater and surface water in the lagoon using parametric and nonparametric correlations between GWD data (obtained by seepage meter), groundwater hydraulic head (obtained by mini piezometers), internal lagoon level, external level (of the ocean) and hydraulic gradient (estimated by the difference between lagoon and ocean levels). The results indicated that the internal and external levels, and the hydraulic gradient met interrelated patterns. The internal level showed a positive correlation with the gradient ($r_{\text{pearson}} = 0.46$). The external level showed a stronger negative correlation ($r_{\text{pearson}} = -0.70$ and $r_{\text{spearman}} = -0.74$) with the hydraulic gradient. It was an expected behavior due to the elevated lagoon's position in relation to the sea. The hydraulic gradient showed a significant correlation with the hydraulic head of several piezometers, however, the relationship with the internal level was always stronger. In general, the piezometers hydraulic heads located in southern lagoon showed a high correlation between themselves and with the internal lagoon level. This was expected, because of their relative proximity and the bottleneck between southern and northern regions of the lagoon, which generates a region with a longer detention time in the south of the lagoon.

Resumo: Apesar de diversos estudos hidrológicos realizados em bacias hidrográficas costeiras, os fluxos de águas subterrâneas nessas áreas foram negligenciados devido à invisibilidade das descargas de águas subterrâneas (DAS). Assim, este estudo analisou a Lagoa da Conceição, uma laguna costeira em Santa Catarina, de significativa importância ecológica, paisagística e econômica. O objetivo deste trabalho foi analisar as interações entre águas subterrâneas e superficiais na laguna em diferentes regiões, utilizando correlação paramétrica e não paramétrica entre dados de DAS (obtida por *seepage meter*), carga hidráulica subterrânea (obtida por mini piezômetros), nível interno da laguna, nível externo (do oceano) e gradiente hidráulico (formado pela diferença dos níveis lagunar e oceânico). Os resultados indicaram que os níveis interno e externo, e o gradiente hidráulico apresentaram padrões inter-relacionados. O nível interno mostrou correlação paramétrica positiva com o gradiente ($r = 0,46$). O nível externo apresentou correlação negativa mais forte ($r_{\text{pearson}} = -0,70$ e $r_{\text{spearman}} = -0,74$) com o gradiente hidráulico, comportamento esperado pela posição elevada da laguna em relação ao mar. O gradiente hidráulico apresentou correlação significativa com o fluxo de diversos piezômetros, porém, a relação com o nível interno sempre mais forte. No geral, as cargas hidráulicas dos piezômetros localizados ao sul da laguna apresentaram elevada correlação entre si e com o nível

1) Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); vinicius.abf@gmail.com;

2) Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); priscilla.kern@gmail.com;

3) Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); patricia.kazue@ufsc.br;

4) Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); davide.franco@ufsc.br;

interno. Isto, era esperado, visto a relativa proximidade dos mesmos e ao estrangulamento entre a região sul e norte da laguna, que gera uma região com tempo de detenção mais elevado no sul lagunar.

Palavras-Chave – correlação; laguna; fluxo de águas subterrâneas.

1. INTRODUÇÃO

As lagunas costeiras são ecossistemas marinhos rasos que desempenham diversas funções essenciais, conectando-se ao oceano por um ou mais canais (KJERFVE, 1994). Elas exercem um papel crucial no transporte e deposição de matéria na zona costeira (KJERFVE, 1994), além de fornecerem serviços ecossistêmicos e oportunidades econômicas, como agricultura, piscicultura e turismo (KENNISH; PAERL, 2010). As descargas de águas subterrâneas desempenham um papel crucial na preservação ou recuperação de ecossistemas valiosos em corpos d'água superficiais e na transição entre águas subterrâneas e superficiais subjacentes (DUQUE; ROSENBERRY, 2022). Os fluxos de água subterrânea foram por muitos anos negligenciados em ambientes como as lagunas costeiras, conforme destacado por Lewandowski et al.(2013), isso se deve, em parte, à natureza invisível das descargas de águas subterrâneas (DAS), tornando sua mensuração desafiadora devido à falta de métodos simples e eficazes. A complexidade em quantificar a quantidade de DAS também é influenciada pela desuniformidade das descargas, exigindo múltiplas medidas, e pela difusão das descargas em uma extensa área. A variabilidade espacial e temporal do fluxo de água subterrânea é afetada por diversos fatores, incluindo forças terrestres e marítimas, como precipitação, características físicas dos aquíferos e variação da maré. Esses elementos exercem influência nas cargas hidráulicas e na velocidade do fluxo, contribuindo para a complexidade do desafio de compreender e quantificar as descargas subterrâneas (KERN; FRANCO; UDA, 2022).

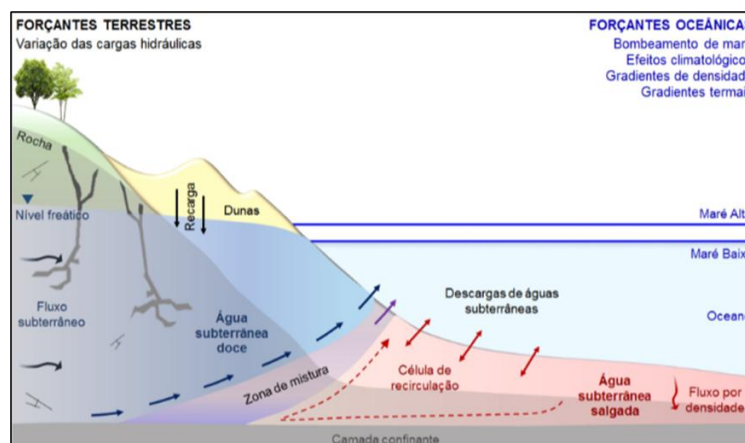
A Lagoa da Conceição, com cerca de 20 km², é uma laguna costeira subtropical na Ilha de Santa Catarina, sul do Brasil. A Lagoa da Conceição é um ecossistema lagunar costeiro de significativa importância ecológica, paisagística e econômica na região. Além de abrigar uma diversidade de espécies marinhas, ela também se destaca como um patrimônio arqueológico, atraindo a atenção de visitantes e turistas (PORTO FILHO, 1993). A ruptura de uma lagoa de evapoinfiltração, em janeiro de 2021 despejou 79.000 m³ de efluente tratado provenientes da Estação de Tratamento de Esgotos do bairro na laguna. O evento causou danos significativos ao ecossistema e dando destaque a necessidade de monitoramento ambiental na laguna (DE LIZ ARCARI et al., 2023) e, também, das descargas subterrâneas, que, neste caso, também carregam uma alta carga de nutrientes. Levando em conta os danos causados pelas descargas subterrâneas em cenários de contaminação, estudos hidrológicos são necessários para compreender a hidrodinâmica e garantir a preservação sustentável desse ambiente (KERN, 2019).

Diversos trabalhos e pesquisas foram desenvolvidos na bacia hidrológica da Lagoa da Conceição, levantando e avaliando dados contribuindo para melhor compreensão do funcionamento hidrológico na laguna. Arcari (2018), Kern (2019), Ikezawa (2019) e Tavares et al.(2023) avaliaram aportes de descargas de águas subterrâneas a partir do monitoramento com equipamentos de baixo custo, como piezômetros e seepages, calibrados por (KERN et al., 2023). Além disso foram estudados a hidrodinâmica da laguna (SILVA, 2021), relação entre os níveis oceânico e lagunar (HESS et al., 2023) e condutividade hidráulica (SILVA, 2022).

As trocas e interações entre águas subterrâneas e superficiais são intrinsicamente governadas pelos fatores geomorfológicos, as propriedades hidrogeológicas do aquífero, as condições climáticas e, quando se trata de áreas costeiras, da dinâmica hídrica local (SOPHOCLEOUS, 2002). Flutuações diárias nas fases de maré, posição do nível do mar a longo prazo e as variações nas taxas de recarga

de água subterrânea representam forças dinâmicas que operam em uma gama de escalas de tempo, regendo a movimentação na zona de transição (BARLOW, 2003; KERN; FRANCO; UDA, 2022) (Figura 1).

Figura 1: Zona de transição água doce-salgada em um aquífero idealizado



Fonte: (KERN; FRANCO; UDA, 2022)

Nesse contexto, essa pesquisa pretende investigar a correlação entre diferentes parâmetros que podem influenciar as interações entre águas subterrâneas e superficiais: fluxos de água subterrânea, carga hidráulica subterrânea, nível lagunar e oceânico, dando continuidade à linha de pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar), que estuda a hidrodinâmica de ambientes costeiros.

2. METODOLOGIA

Caracterização da Área de Estudo

A bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição (Figura 2a), com 78 km², localiza-se na porção centro leste da Ilha de Santa Catarina. A Lagoa da Conceição é uma laguna estrangulada, ligada ao mar por um canal. Possui uma lâmina d'água de 22 km², volume de 66.648.179 m³ (SILVA, 2021). A batimetria da laguna varia significativamente ao longo de sua extensão, com áreas de apenas algumas dezenas de centímetros em grandes bancos de areia, regiões mais profundas de até 4 metros na região sul, 5 metros na sua região central e 9 metros nas regiões mais profundas (SILVA, 2021).

A região apresenta clima Cfa, mesotérmico úmido, sem estação seca definida. A precipitação é distribuída pelo ano inteiro, mostrando maiores valores no verão e primavera (predominantemente entre 150 e 200 mm/mês) e menores no outono e inverno (em torno de 100 mm/mês).

O domínio geológico do Granito Ilha delimita a bacia da Lagoa da Conceição a oeste e sul, com extensões na parte oeste. Na porção leste, predominam depósitos lagunares praias, flúvio lagunares-lacustres e marinhos praias, enquanto ao sudeste estende-se uma ampla área de depósitos eólicos, incluindo dunas longitudinais fixas e dunas transversais ativas, conforme. (ARCARI, 2018; GUEDES JUNIOR, 1999). O Aquífero Ilha, localizado na margem oeste da bacia da Lagoa da Conceição, é fraturado, com características variáveis de infiltração e escoamento superficial. O Aquífero Campeche, na porção sudeste, consiste em dunas ativas com alto potencial de água subterrânea. O fluxo subterrâneo se dirige para a Lagoa da Conceição e Praia da Joaquina. Além disso, a recarga ocorre por meio de uma lagoa de evapoinfiltração (LEI) associada à Estação de Tratamento de Esgotos da CASAN Figura 2b.

Na bacia (Figura 2c), há areias quartzosas com textura de areia ou areia franca com uma profundidade significativa e alta taxa de infiltração. As dunas, caracterizadas por depósitos arenosos de dunas móveis afetados pelo vento, apresentam uma taxa de infiltração superior às areias quartzosas. Por outro lado, o argissolo, encontrado em encostas de morros e colinas, possui uma textura areno-argilosa e uma profundidade de aproximadamente 1,5 metros, o que resulta em uma baixa infiltração de água e, consequentemente, um alto escoamento superficial. As areias marinhas têm uma alta capacidade de infiltração, mesmo sob condições de umidade elevada (KERN, 2019).

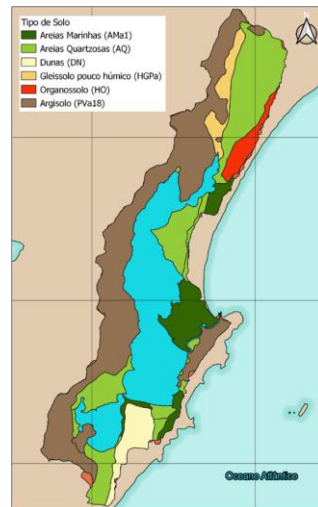
Figura 2a: Localização da bacia da Lagoa da Conceição



Figura 2b: Mapa hidrogeológico da bacia.



Figura 2c: Mapa de solos da bacia.



Fonte: Elaborado pelos autores

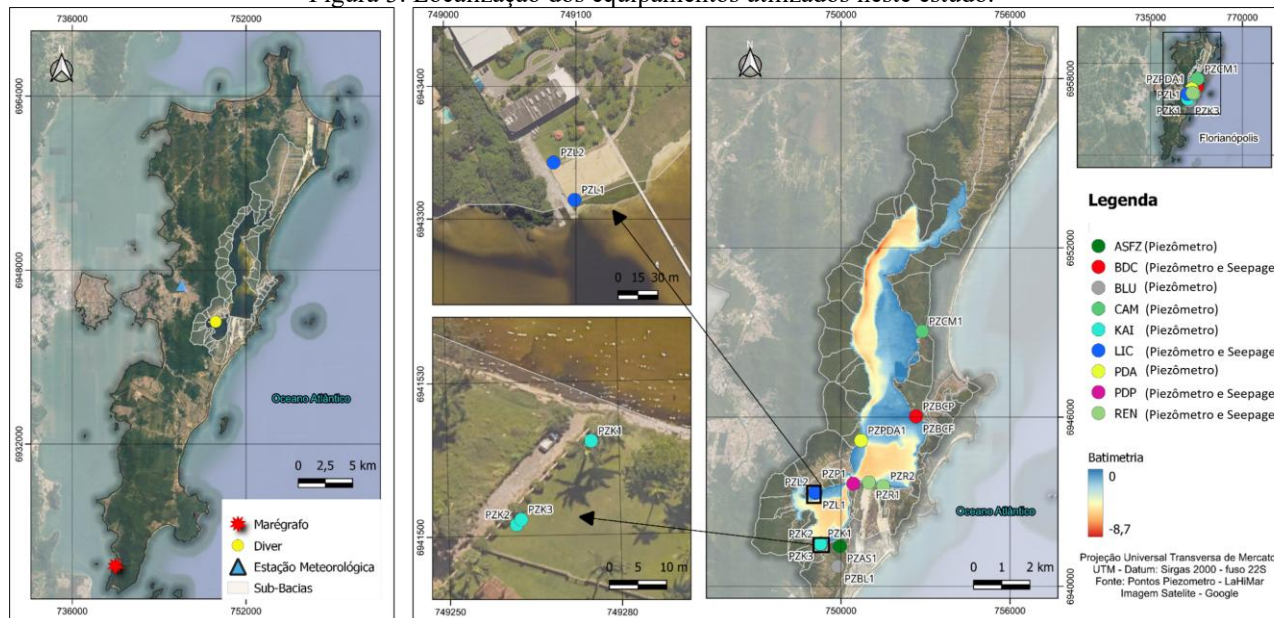
Materiais

Para a realização deste estudo, foram utilizados os seguintes dados, obtidos tanto gratuitamente com a Epagri quanto por meio do monitoramento realizado pelo LAHIMAR, conforme apresentado na Figura 3.

- dados de precipitação: obtidos da Epagri/SC da estação meteorológica localizada no Cetre/Epagri (lat. -27,5814° e long. -48,5072°), em mm/h, de junho de 2022 a outubro de 2023.
- dados do nível externo do mar, obtidos da Epagri/SC e provenientes do marégrafo situado no sul de Florianópolis (lat. -27,8161° e long. -48,5639°), de junho de 2022 a outubro de 2023.
- dados de nível interno da laguna, adquiridos a cada 30 minutos pelo LaHiMar/UFSC de outubro de 2022 a setembro de 2023, através de um sensor de pressão TD-Diver, localizado no Lagoa Iate Clube.
- Dados de carga hidráulica subterrânea, em metros, de junho de 2022 a outubro de 2023, através de mini piezômetros instalados no Lagoa Iate Clube (LIC), na Servidão Kairos (KAI), no Camping do Rio Vermelho (CAM), Avenida das Rendeiras (REN), Ponta das Almas (PDA), Ponto dos Pombos (PDP), Pousada Assefaz (ASFZ), Beco da Lua (BLU) e Beco dos Coroas (BDC). Para obtenção da cota real da carga hidráulica medida nos piezômetros, foi feita a coleta da altimetria deles, usando RTK. Esta técnica utiliza medições de fases das portadoras e pseudodistâncias para calcular distâncias entre as antenas do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), garantindo uma precisão vertical de 1 a 1,50 cm.
- Dados de fluxo de água subterrânea nos pontos LIC, BDC, REN e PDP, de junho de 2022 e a outubro de 2023, obtidos por meio de campanhas semanais de medição em campo, através de

equipamentos de medição direta, chamados de *Seepage meters*. A partir de janeiro de 2023, o monitoramento de fluxo subterrâneo abrangeu todos os quatro pontos.

Figura 3: Localização dos equipamentos utilizados neste estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores

Métodos

Num primeiro momento, foram estimadas as estatísticas básicas do nível interno da laguna, nível externo do oceano e do gradiente hidráulico (nível interno – nível externo). Após, foram feitas análises preliminares da variação dos níveis interno e externo, do gradiente hidráulico, juntamente com o comportamento da precipitação. Para análise de correlação foram utilizadas as correlações de Pearson e Spearman, e os dados de fluxo de água subterrânea (DAS) para cada ponto de monitoramento, e o fluxo subterrâneo obtido a partir da carga hídrica medida nos mini piezômetros e condutividade hidráulica estimada para cada ponto de monitoramento, nível interno da laguna, nível externo do oceano e gradiente hidráulico calculado (FERREIRA, 2023). A utilização da correlação tem como objetivo quantificar e avaliar a força e a direção da relação entre duas variáveis. Ao calcular a correlação de Pearson ou Spearman, busca-se compreender se há uma associação entre as variáveis e qual é a natureza dessa associação, seja ela linear ou não linear.

O coeficiente de correlação de Pearson é definido pela equação (1) (JOHNSON; BHATTACHARYYA, 2010)

$$\rho P = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Onde (x_i, y_i) são pares de n observações das variáveis x e y com médias \bar{x} e \bar{y} , respectivamente. Portanto, a correlação de Pearson é uma medida de associação entre duas variáveis quantitativas contínuas, que indica o grau de relação linear entre elas. O coeficiente de correlação (ρ) varia de -1 a +1, representando força e direção da associação entre variáveis. Valores próximos a -1 indicam uma forte correlação negativa, enquanto valores próximos a +1 indicam uma forte correlação positiva. Quando ρ se aproxima de 0, sugere uma correlação fraca ou inexistente. Em distribuições conjuntas normais, correlação nula implica independência linear entre as variáveis x e y . No entanto, uma correlação nula, mesmo pequena, pode indicar uma relação não linear entre as

variáveis.(ORIGUELA, 2018). O coeficiente de correlação de Spearman é definido pela equação (2) (JOHNSON; BHATTACHARYYA, 2010)

$$\rho S = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \frac{n+1}{2})(S_i - \frac{n+1}{2})}{\sqrt{\frac{n(n^2-1)}{12}}} \quad (2)$$

Os postos das variáveis ou posição dos dados dispostos na forma ordenada, representados por R_i e S_i , são utilizados no cálculo do coeficiente de Spearman, que varia de -1 a +1. Diferentemente do coeficiente de Pearson, o de Spearman não necessariamente indica uma associação linear, mas revela relações crescentes ou decrescentes. Em casos nos quais os dados seguem uma relação monotônica e não linear, o coeficiente de correlação de Spearman pode ser mais apropriado para capturar a natureza da relação entre as variáveis (ORIGUELA, 2018).

3. RESULTADOS

Chuva, níveis e gradiente hidráulico

A Tabela 1 apresenta as estatísticas básicas para níveis Interno e externo e gradiente hidráulico. O gradiente hidráulico foi calculado de maneira direta, diminuindo o Nível interno, do Nível Externo. O gradiente hidráulico, desta forma, pode apresentar-se de maneira negativa, quando existe uma maior elevação do nível externo, e de maneira positiva, quando existe uma elevação maior do nível interno. O gradiente hidráulico possui valores mínimos de -15,4 cm e máximos de 101,3 cm, com uma média de 35,5 cm.

Tabela 1: Estatísticas básicas para Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico

Dados	Mínimo (cm)	Máximo (cm)	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)
Nível Interno (cm)	47,1	128,9	90,3	11,2
Nível Externo (cm)	14,9	127,3	54,9	14,3
Gradiente Hidraulico (cm)	-15,4	101,3	35,5	14,9

Fonte: Elaborado pelos autores.

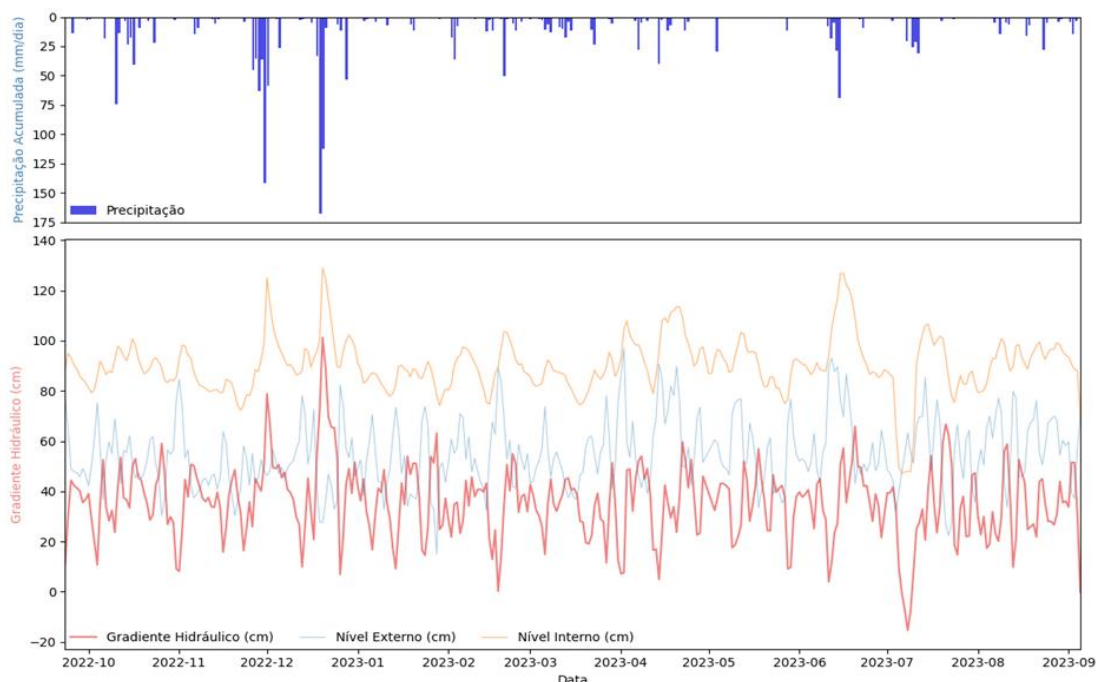
A Figura 4 apresenta os níveis interno e externo, junto com o gradiente hidráulico, além disso o gráfico superior apresenta a precipitação acumulada por dia (mm/dia), no período de setembro de 2022 até setembro de 2023.

O nível interno é regido tanto pelo nível externo quanto pela precipitação. Na Figura 4 é possível observar, entre dezembro de 2022 e janeiro de 2023, dois grandes picos nos valores de nível interno, coincidindo com os altos valores de precipitação para o mesmo período. Por sua vez, o nível externo permaneceu baixo, já que, é influenciado por outros fatores, como o vento. O gradiente, neste caso, subiu junto com o nível interno, considerando a diferença entre nível interno e externo.

No período de junho a julho de 2023 é possível acompanhar um comportamento diferente do descrito acima. Nesse caso, o nível externo subiu, e, conseqüentemente, houve um grande pico no nível interno, assim como no período de dezembro de 2022 e janeiro de 2023, porém, com outro cenário causal. Neste contexto, destaca-se que o período entre junho e julho possui características de uma estação menos úmida, e, com isso a laguna encontrava-se em um estágio de redução de nível. Simultaneamente, o nível externo, influenciado por diversas forças, estava também em um estado (nível) inferior, provocando o escoamento da laguna para o oceano, através do canal e, conseqüentemente, resultando em uma diminuição no nível interno, como pode ser visto na série temporal. Subseqüentemente, observou-se a elevação do nível externo para sua média usual,

ocasionando um gradiente hidráulico negativo. A pluviometria, se comparada com o cenário do parágrafo anterior, foi baixa. O gradiente hidráulico, então, seguiu o aumento dos níveis.

Figura 4: Precipitação acumulada por dia, Níveis Interno e Externo e Gradiente Hidráulico.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Correlação entre a variação dos fluxos de água subterrânea com o gradiente hidráulico

Para realizar os estudos de correlações entre os dados é necessário que os dados possuam uma distribuição aparentemente normal. A Tabela 2 apresenta a comparação entre Coeficientes de Pearson e Spearman para as variáveis do estudo. Na diagonal superior são mostrados os valores para o coeficiente de correlação de Pearson (correlação paramétrica). Já na diagonal inferior são apresentados os valores para o coeficiente de correlação de Spearman (correlação não-paramétrica). Os dados realçados em marrom claro indicam correlações que são significativas ($p < 0,05$).

Tabela 2: Coeficientes de correlação. Diagonal superior: coeficiente de correlação de Pearson (correlação paramétrica). Diagonal inferior: coeficiente de correlação de Spearman R (correlação não-paramétrica). Em vermelho estão indicadas as correlações que são significativas ($p < 0,05$).

	Variáveis	Correlação paramétrica (Pearson)												
		DAS_LIC	DAS_BDC	DAS_REN	DAS_PDP	PZ_PDP	PZ_KAI	PZ_BLU	PZ_CAM	PZ_ASFZ	PZ_LIC	PZ_REN	Nível Interno	Nível Externo
Correlação não paramétrica (Spearman)	DAS_LIC	1,00	-0,01	0,13	0,24	0,05	0,16	-0,13	0,02	-0,23	0,16	0,08	0,22	0,22
	DAS_BDC	0,02	1,00	-0,10	-0,09	-0,14	0,14	-0,01	-0,27	-0,07	-0,01	-0,07	-0,18	-0,13
	DAS_REN	0,24	-0,17	1,00	-0,21	0,53	0,29	0,43	-0,39	0,28	0,22	0,40	0,45	0,18
	DAS_PDP	0,21	-0,11	0,06	1,00	-0,29	-0,35	-0,56	0,44	-0,42	-0,16	-0,23	-0,24	0,03
	PZ_PDP	0,03	-0,08	0,55	-0,21	1,00	0,81	0,19	-0,21	0,14	0,74	0,90	0,82	0,35
	PZ_KAI	0,14	0,07	0,40	-0,36	0,79	1,00	0,24	0,02	0,35	0,88	0,83	0,69	0,26
	PZ_BLU	-0,21	0,03	0,23	-0,61	0,46	0,58	1,00	-0,36	0,54	0,10	0,17	-0,04	-0,06
	PZ_CAM	-0,04	-0,19	-0,27	0,21	-0,11	0,10	0,00	1,00	-0,19	0,31	0,02	0,15	0,27
	PZ_ASFZ	-0,16	-0,06	0,28	-0,46	0,24	0,50	0,73	-0,08	1,00	0,17	0,08	-0,02	-0,13
	PZ_LIC	0,10	-0,01	0,31	-0,10	0,72	0,84	0,34	0,39	0,23	1,00	0,82	0,71	0,43
	PZ_REN	0,08	-0,04	0,44	-0,09	0,86	0,73	0,31	0,09	0,15	0,82	1,00	0,83	0,38
	N. Interno	0,25	-0,17	0,39	0,06	0,74	0,64	-0,04	0,03	-0,03	0,71	0,78	1,00	0,31
	N. Externo	0,20	-0,05	0,26	0,03	0,23	0,12	-0,07	0,25	-0,17	0,24	0,26	0,33	1,00
	Grad. Hid.	-0,01	-0,03	0,07	-0,07	0,37	0,44	0,10	-0,17	0,16	0,41	0,34	0,31	-0,74
	Grad. Hid.													1,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

No caso da correlação entre o gradiente hidráulico e as demais variáveis, destacado em negrito, o coeficiente de correlação de Pearson foi significativo ($P > 0.05$) entre o gradiente hidráulico e seguintes variáveis: Nível externo, Nível interno, PZ REN, PZ LIC, PZ KAI e PZ PDP, indicando a presença de uma relação linear entre o gradiente e as variáveis.

Porém, como o coeficiente de correlação de Spearman foi significativo para as mesmas variáveis (Nível externo, Nível interno, PZ REN, PZ LIC, PZ KAI e PZ PDP) e além disso apresentou valores semelhantes ao de Pearson, pode haver uma relação monotônica entre as variáveis. Deve-se investigar uma tendência geral na relação entre o gradiente e as variáveis supracitadas, que não siga uma forma linear específica.

Os valores com as células ressaltadas em marrom claro, destacam correlações que foram significativas apenas em um tipo de coeficiente de correlação, Spearman ou Person. As correlações de DAS REN com PZ KAI e PZ LIC; PZ PDP com PZ BLU; PZ KAI com PZ BLU; e PZ BLU com PZ LIC e PZ REN apresentaram valores significativos apenas para o coeficiente de Spearman. Isso revela que estes dados têm uma correlação não paramétrica, ou seja, a relação entre eles não segue uma forma linear específica, o aumento ou diminuição em um deles não implica em uma taxa constante com relação ao outro.

Já os valores de correlação de Nível externo com PZ PDP, KAI, LIC e REN; e PZ BLU com DAS REN; e PZ BLU com PZ CAM apresentam valores significativos apenas para Pearson, indicando que estes dados seguem uma correlação paramétrica, seguindo uma relação linear. É possível observar que a relação entre PZ CAM e PZ BLU é significativa, porém negativa, sugerindo que o aumento de uma variável significa a diminuição da outra. É preciso melhor avaliar esses dados para que possa chegar a uma melhor conclusão sobre esse coeficiente.

PZ REN e PZ PDP apresentam uma forte relação, chegando a um coeficiente de 0,90 em Pearson. Tal relação é a de maior valor significativo entre todos os dados da série. Tal resultado pode ser explicado pela proximidade dos pontos, que se encontram no subsistema central da Lagoa da Conceição

Percebe-se que os valores de DAS LIC e DAS BDC não apresentam nenhum tipo de correlação significativa com os outros dados. Todos os outros dados têm, ao menos, algum tipo de correlação significativa com outro. De maneira geral, observa-se uma grande correlação entre os piezômetros entre si, que também compartilham correlações significativas com o Nível interno da laguna.

CONCLUSÃO

A análise dos padrões dos níveis oceânico e da laguna revelam uma relação entre os níveis interno e externo, juntamente com o gradiente hidráulico. Picos simultâneos nos valores de nível interno, associados a períodos de alta precipitação, indicam a influência significativa e rápida resposta da chuva no comportamento dos níveis na laguna.

O nível interno apresentou correlação paramétrica positiva com o gradiente hidráulico ($r = 0,46$), enquanto o nível externo mostrou correlação negativa mais forte ($r = -0,70$). Esse padrão é esperado, já que a laguna está situada em uma cota mais alta que o mar, favorecendo o fluxo subterrâneo em direção à zona costeira. Assim, o aumento do nível interno tende a intensificar o gradiente, enquanto a elevação do nível externo o reduz.

Não foi possível identificar uma correlação entre as DAS e o gradiente hidráulico. Recomenda-se uma análise mais aprofundada para compreender melhor essas relações e categorizá-las em diferentes cenários.

O gradiente hidráulico apresentou correlações significativas com as variáveis nível interno, nível externo, PZ_REN, PZ_LIC, PZ_KAI e PZ_PDP, tanto nos testes de Pearson quanto de Spearman. Em todos os piezômetros onde houve correlação significativa com o gradiente, também foi observada uma correlação ainda mais forte com o nível interno, sugerindo que este exerce maior influência sobre o nível piezométrico que o gradiente hidráulico. Esse padrão indica a necessidade de aprofundar a análise para compreender melhor a relação entre o gradiente e o fluxo subterrâneo, especialmente considerando que essas correlações podem não seguir uma relação linear direta.

REFERÊNCIAS

- ARCARI, T. *As interações entre águas subterrâneas e superficiais em uma laguna costeira: Lagoa da Conceição, Florianópolis/SC, Brasil*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
- BARLOW, P. M. Ground water in freshwater-saltwater environments of the Atlantic Coast. [S.l.]: United States Geological Survey, 2003.
- DE LIZ ARCARI, A. et al. *The Wastewater Contamination Index: A methodology to assess the risk of wastewater contamination from satellite-derived water quality indicators*. *Frontiers in Environmental Science*, v. 11, p. 1130655, 2 mar. 2023.
- DUQUE, C.; ROSENBERRY, D. O. *Advances in the study and understanding of groundwater discharge to surface water*. *Water*, v. 14, n. 11, p. 1698, 25 maio 2022.
- FERREIRA, V. A. B. *Caracterização dos fluxos de água subterrânea da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição*. Trabalho de Conclusão de Curso. UFSC. 2023.
- GUEDES JUNIOR, A. *Mapeamento hidrogeológico da Ilha de Santa Catarina utilizando geoprocessamento*. [S.l.: s.n.], 1999.
- HESS, J. H. et al. *Influência da precipitação e do nível oceânico nos níveis de uma laguna costeira*. In: XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023.
- IKEZAWA, M. Estudo sobre o aporte de água subterrânea na região leste da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, Brasil. Florianópolis: [s.n.], 2019.
- JOHNSON, R. A.; BHATTACHARYA, G. K. *Statistics: principles & methods*. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- KENNISH, M. J.; PAERL, H. W. *Coastal lagoons: critical habitats of environmental change*. In: KENNISH, M. J.; PAERL, H. W. (Ed.). *Coastal lagoons: critical habitats of environmental change*. Boca Raton: CRC Press, 2010. p. 1–14.
- KERN, P. *Estimativa de fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões de uma laguna subtropical: Lagoa da Conceição – Florianópolis/SC*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- KERN, P. et al. *A low-cost system for calibrating methodologies used to measure GW-SW flow*. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, [s.l.], 1 ago. 2023.
- KERN, P.; FRANCO, D.; UDA, P. K. *Descarga de águas subterrâneas em lagunas costeiras subtropicais*. In: *Gestão ambiental e sustentabilidade em áreas costeiras e marinhas: conceitos e práticas*. [S.l.: s.n.], v. 2, p. 87–110, 2022.
- KJERFVE, B. *Coastal lagoons*. In: KJERFVE, B. (Ed.). *Coastal lagoon processes*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 1–8. (Elsevier Oceanography Series, 60).
- LEWANDOWSKI, J. et al. *From submarine to lacustrine groundwater discharge*. *Hydrobiologia*, v. 365, 2013.
- ORIGUELA, L. A. *Estudo da influência de eventos sobre a estrutura do mercado brasileiro de ações a partir de redes ponderadas por correlações de Pearson, Spearman e Kendall*. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2018.

- PORTO FILHO, É. *Sedimentometria e algumas considerações sobre a biogeoquímica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina*. [S.l.: s.n.], 1993.
- SILVA, E. C. *Comparação de métodos para determinação de condutividade hidráulica nos sedimentos de uma bacia hidrográfica costeira*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.
- SILVA, V. E. C. *Análise hidrodinâmica e biogeoquímica de uma laguna costeira subtropical em bacia hidrográfica urbanizada: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina*. Florianópolis: [s.n.], 2021.
- SOPHOCLEOUS, M. *Interactions between groundwater and surface water: the state of the science*. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p. 52–67, fev. 2002.
- TAVARES, J. A. et al. *Caracterização das descargas subterrâneas em uma laguna costeira*. [S.l.: s.n.], 2023.