

COMPORTAMIENTO DE LA INTERFASE AGUA DULCE – AGUA SALADA EN EL CORDÓN COSTERO, BUENOS AIRES. CASO DE ESTUDIO: PINAMAR

Leandro Rodrigues Capítulo^{*}, Silvina Carretero¹, Samanta Anguiano^{**}, Leonardo Ledesma^{**}, Julieta Chaganek^{**}, Leonardo Sánchez Caro^{*} y Eduardo Kruse^{*}

^{*} CONICET, CEIDE, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), 64 n° 3, (1900) La Plata, Argentina. E-mail: leandrorodriguescapitulo@gmail.com

^{**} Secretaría de Paisaje y Medio Ambiente, Municipio de Pinamar Av. Shaw 18, (7167) Pinamar, Argentina.

RESUMEN

El estudio de la zona de interfase agua dulce-agua salada (IADAS) resulta fundamental para la caracterización de acuíferos costeros y la evolución de las reservas de agua dulce. En este trabajo se estudia los factores que condicionan el comportamiento de la IADAS en la localidad de Pinamar. Para llevar a cabo esta tarea se realizó una perforación de monitoreo sobre el frente costero, se realizaron perfilajes de conductividad eléctrica (CE) y se instalaron sensores continuos de presión, temperatura y CE. Se recopiló información proveniente del mareógrafo ubicado en la localidad de Santa Teresita mientras que los datos hidrometeorológicos se obtuvieron a partir de estación ubicada en la localidad de Pinamar. Se verifica una correlación entre los eventos de marea alta y los valores de CE, nivel hidráulico y temperatura. Los tiempos de respuesta entre el evento de marea y el aumento de la CE se reconocen menos de 8 h, en tanto que el intervalo requerido para alcanzar nuevamente el equilibrio demora al menos 2 días. Las variaciones de la temperatura se encuentran influenciadas por las condiciones climáticas dominantes al momento del ascenso de la marea. El análisis de la relación entre la variación del almacenamiento y los eventos de marea permiten inferir que, cuando se producen eventos de recarga, existe una mayor estabilidad debido al incremento de la carga hidráulica sobre la IADAS. El estudio del comportamiento de la IADAS resulta un indicador eficaz para la gestión de los recursos hídricos en sectores costeros.

Palabras Claves: acuíferos costeros, interfase Agua Dulce Salada, Pinamar.

ABSTRACT

The study of the freshwater-saltwater interface zone (FWSWI) is essential for the characterisation of coastal aquifers and the evolution of freshwater reserves. In this work the factors conditioning the behaviour of the FWSWI in the locality of Pinamar is studied. In order to accomplish this task, a monitoring borehole was drilled on the coastal front, electrical conductivity (EC) profiling was carried out and pressure dataloggers, temperature and EC were installed. Information was collected from the tide gauge located in Santa Teresita, while hydrometeorological data were obtained from the weather station located in Pinamar. A correlation between high tide events and EC, groundwater level and temperature values is verified. The response time between the tidal event and the increase in EC is less than 8 hours, while the interval required to reach the equilibrium again takes at least 2 days. Temperature variations are conditioned by the prevailing climatic conditions at the time of the tidal rise. The analysis of the relationship between storage variation and tidal events allows to infer that, when recharge events occur, there is a greater stability due to the increase in the

hydraulic pressure on the FWSWI. The study of the behaviour of the FWSWI is an effective indicator for the management of groundwater resources in coastal sectors.

Keywords: coastal aquifers, Freshwater-Salt Water Interface, Pinamar.

INTRODUCCIÓN

Las zonas litorales han experimentado presiones en sus valores ambientales como resultado del desarrollo poblacional. Este desarrollo ha sido posible, entre otros factores, por la existencia de recursos hídricos, ya sea a través de la utilización del agua superficial o del agua subterránea. El crecimiento económico durante el último siglo ha conllevado una explotación agresiva de estos recursos. Como resultado, las reservas de agua han disminuido y su calidad se ha deteriorado, afectando tanto a su disponibilidad para los usos humanos como para la preservación de los ecosistemas (Kruse y Mas Pla, 2009).

El estudio del comportamiento de la Interfase Agua Dulce Salada (IADAS) constituye una de las temáticas de mayor relevancia para la caracterización de acuíferos costeros, resultando un indicador eficaz para evaluar y cuantificar la evolución de las reservas de agua dulce disponibles.

Los primeros antecedentes acerca de la dinámica de la IADAS constituyen los trabajos realizados por el CFI (1993), quienes, en base a información hidroquímica de perforaciones de explotación, indican una interfase de alto ángulo para la localidad de Pinamar y cuya influencia se restringe únicamente al sector de playa.

Un aporte de relevancia fue el realizado por Perdomo et al. (2013), quienes identificaron procesos de descarga subterránea de agua dulce mediante la aplicación de tomografías eléctricas. Además, verificaron que la zona de transición en superficie se manifiesta en una transecta de unos 100 metros de longitud desde valores asimilables a agua dulce hasta valores conductivos similares a los del mar.

Posteriormente, Rodrigues Capítulo (2015) y Rodrigues Capítulo y Kruse (2018) en base a la interpretación del comportamiento hidrodinámico, hidroquímico y contenidos isotópicos en perforaciones, formularon un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico a partir del cual fue posible estimar la configuración general de la IADAS para las localidades de Montecarlo, Pinamar, Valeria del Mar y Cariló. Asimismo, mediante el análisis de conductividades eléctricas de perforaciones costeras, identificaron procesos de incipiente salinización en las localidades de Pinamar y Cariló.

Otra contribución de importancia ha sido la realizada por Carretero et al. (2019) quienes, mediante la determinación de ^{222}Rn en perforaciones de monitoreo y en una transecta paralela a la línea de costa en el cordón costero, describieron procesos de recarga y descarga subterránea, así como también la variabilidad estacional de la descarga en relación a los excesos del balance hídrico.

En este trabajo se analizan los factores que condicionan el comportamiento de la IADAS en la localidad de Pinamar como indicador del estado de las reservas de agua dulce disponibles. A partir de registros de conductividad, nivel hidráulico, temperatura, precipitaciones y mareas, se realiza una interpretación que permita establecer indicadores para reconocer el avance o retroceso de la IADAS como herramienta de planificación para el abastecimiento de la población.

AREA DE ESTUDIO

En el borde oriental de la provincia de Buenos Aires se ubica el Partido de Pinamar ($37^{\circ} 6' 36.66''$ Latitud Sur; $56^{\circ} 52' 17.83''$ Longitud W) (Figura 1). Con una superficie de $66,2 \text{ km}^2$, se trata de un polígono de forma rectangular con su eje mayor ubicado en dirección sudoeste - noreste, que limita al oeste con el Partido de General Juan de Madariaga, al norte con el Partido de La Costa, al sur con el de Villa Gesell, y al este con el Mar Argentino.

El área de estudio corresponde, desde un punto de vista hidrogeológico, a la región “costera” (González, 2005). El clima de la región, de acuerdo a la clasificación Thornthwaite (1948), es B2 B'2 r a', mesotermal, templado frío, con nulo a pequeño déficit de agua y concentración estival de la eficiencia térmica menor del 48%. El valor medio para las precipitaciones es de 900 mm, mientras que para las temperaturas el mismo es de 14,5 °C.

El sector analizado se erige entre la Llanura deprimida y el océano Atlántico y corresponde al sector que geológicamente es conocido como Cordón Costero (Parker y Violante, 1989). El mismo posee entre 2 y 4 km de ancho, presenta su mejor expresión entre Villa Gesell y Punta Médanos y disminuye paulatinamente hacia el norte y sur hasta desaparecer. Se trata de una unidad arenosa que se compone de dos subunidades menores comúnmente denominadas como Playa y Médanos.



Figura 1. Área de estudio. Límites del Partido de Pinamar y sus localidades

El esquema geohidrológico descrito por Rodrigues Capítulo (2015) se compone de una base de edad Pleistocena superior compuesta por “limos arcillosos con intercalaciones carbonáticas” (hidrofacies D) dentro de las cuales se encuentra incluido un nivel acuífero compuesto por las lentes de “arena muy fina” (hidrofacies E). El Holoceno temprano se constituye por las “arenas medianas” (hidrofacies C) de las barreras transgresivas, que representan a una unidad acuífera, y por las “arcillas grises con intercalaciones arenosas” que, formadas en un ambiente de baja energía, conforman un nivel acuitardo (hidrofacies B). Por último, el Holoceno reciente se encuentra representado por las “arenas finas” (hidrofacies A) de la cadena de médanos actual.

El flujo subterráneo de la capa freática (hidrofacies A) está representado por curvas equipotenciales orientadas en forma paralela a la costa, con una divisoria de agua subterránea que tiende a coincidir con las máximas alturas topográficas del cordón costero y sentidos de flujo subterráneo hacia el este (mar) y hacia al oeste (continente).

La capa freática se recarga naturalmente en forma directa por infiltración de los excesos de la precipitación. La recarga de las unidades profundas se produce por filtración vertical en forma indirecta desde la capa freática, tal como se deduce de las diferencias de carga hidráulica, siendo ello más manifiesto en los sectores topográficamente más altos.

Las coberturas del suelo, que incluyen forestación, urbanización y médanos con escasa vegetación o desnudos, muestran diferentes condiciones de infiltración que se reflejan en la configuración del flujo de la capa freática. En este sentido, se reconocen mayores excesos en el suelo desnudo (470 mm/año) con respecto a suelo forestado (261 mm/año), reflejando condiciones de mayor evapotranspiración para la cobertura arbórea.

METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente trabajo se realizaron una serie de trabajos de campo y de gabinete. En el primer caso, las tareas incluyeron la ejecución de una perforación de monitoreo profundo (30 m) ubicada en el sector costero de la localidad de Pinamar (Av. Bunge y Playa, Lat: 37° 7'5.82"S, Long: 56°51'19.07"W) (Figura 2a). Dicha perforación cuenta con un diámetro de 63 mm y se encuentra ranurada desde la superficie hasta el final de la misma. Durante su realización se extrajeron muestras de cutting a partir de las cuales fue posible realizar la confección del perfil litológico.

Se realizaron perfilajes periódicos de la CE en profundidad (Figura 2b). Para llevar a cabo dicha tarea se empleó una sonda TLC (Solinst Model 107). Este equipo posee un rango de medición de 0 a 80,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una exactitud del 5%, en tanto que su calibración se realizó antes de cada perfilaje.

En dicha perforación, también fueron instalados, a una profundidad de 18 mbbp (metros bajo boca de pozo), 2 sensores de la marca HOBO-ONSET a partir de los cuales fue posible obtener registros horarios de conductividad, temperatura y presión, la cual, corregida, permite obtener el valor del nivel freático (Figura 2c y 2d).

Los registros hidrometeorológicos fueron obtenidos a partir de una estación meteorológica municipal (Davis Vantage Pro II) ubicada en la intersección de la Av. Valle Fértil y Rivadavia (Lat: 37° 6'38.73"S, Long: 56°51'52.87"W) en la localidad de Pinamar.

Se realizó la medición mensual de niveles a partir de una red de monitoreo de aguas subterráneas compuesta por 55 perforaciones y que se distribuye en todo el Partido de Pinamar. A partir de dichas mediciones se realizaron mapas de flujo mensuales desde los cuales se estimaron valores de recarga y agotamiento para la serie mayo 2021/abril 2022. Se recopilieron registros horarios de mareas proveniente del mareógrafo ubicado en la localidad de Santa Teresita, que es operado por el Servicio de Hidrografía Naval, para el período mencionado anteriormente.

La estimación de los valores de recarga y agotamiento se realizó mediante el método de las fluctuaciones del nivel freático. Para el cálculo de las áreas comprendidas entre las curvas de isovariación fue necesario el empleo de la herramienta "Reclassify" del módulo "Spatial Analyst," incluido en el software Arcmap 10.2, el cual también fue utilizado para la integración de un sistema de información geográfica.

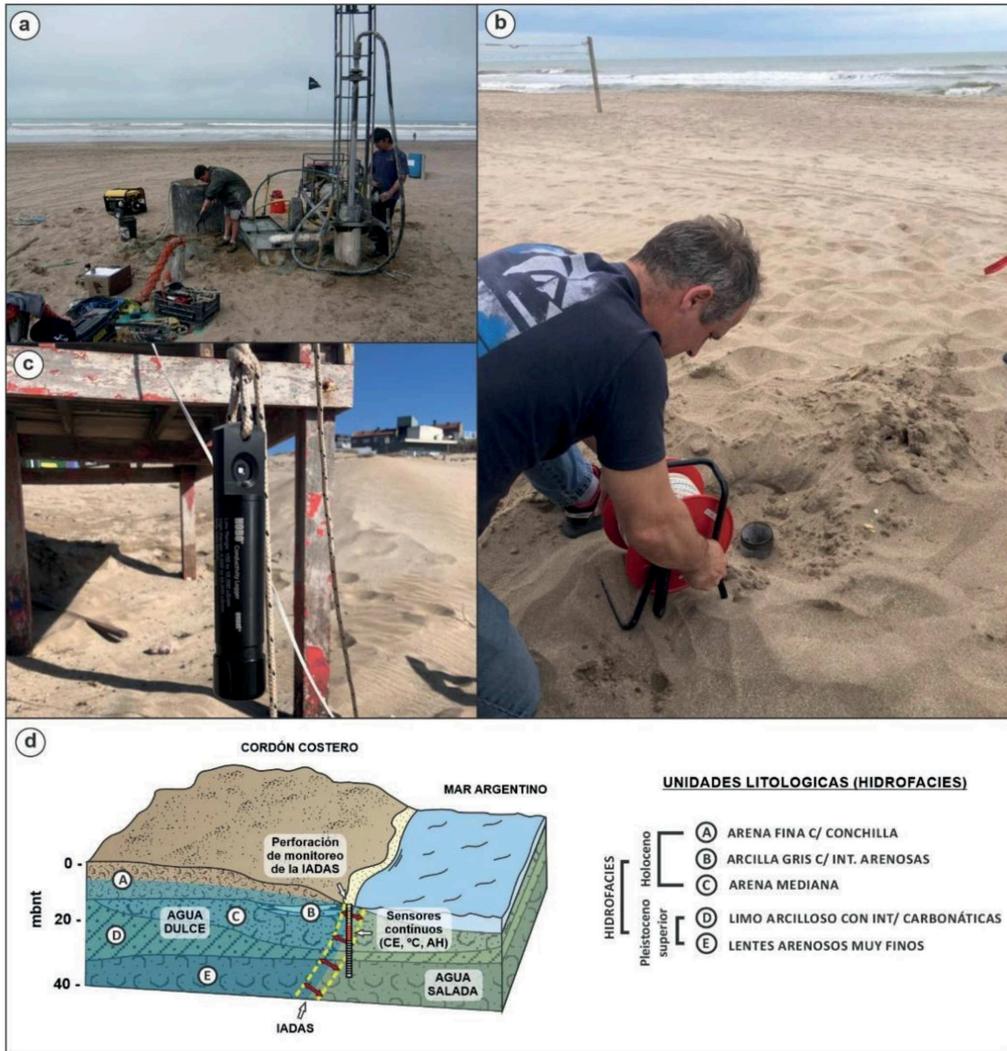


Figura 2. Trabajos de campo. a) Ejecución de perforación de monitoreo, b) Medición de perfiles de conductividad, c) Instalación de sensores de CE, temperatura y altura hidráulica y d) esquema de monitoreo de la IADAS y unidades litológicas existentes en el área de estudio.

RESULTADOS

Los registros obtenidos a partir de los perfilajes de conductividad eléctrica permitieron reconocer la morfología general de la IADAS y las variaciones de la conductividad en profundidad y su evolución temporal para el período comprendido entre 2014 y 2022 (Figura 3).

En términos generales, el perfil se inicia con valores entre 4000 y 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y presenta dos quiebres. El primero de ellos desde 5000 a 7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre los 18 y los 20 mbbp, mientras que el segundo se manifiesta con un salto de 8000 a 19000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre los 22 y los 24 mbbp, a partir de la cual se aprecia un incremento hasta los 35 mbbp con CE de 35000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aproximadamente. Asimismo, el análisis temporal de los perfilajes permitió identificar una mayor variación de las conductividades a partir de profundidades mayores a los 25 mbbp.

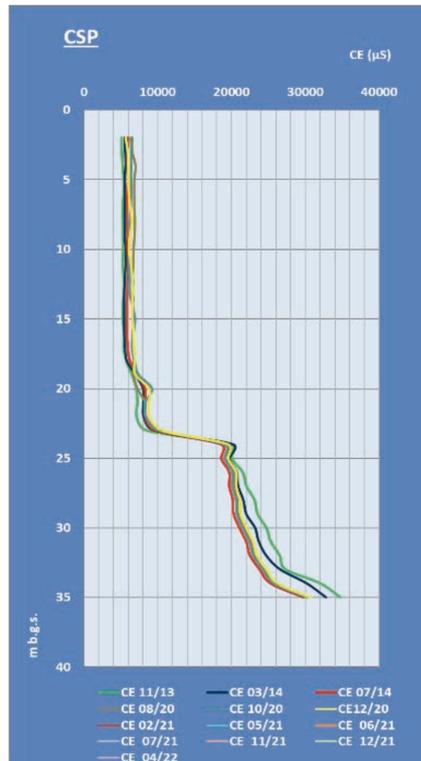


Figura 3. Perfilajes de conductividad eléctrica registradas en la perforación de monitoreo costero

Con el objeto de mejorar la comprensión del comportamiento de la IADAS, en la Figura 4 se muestran los registros horarios de CE y nivel hidráulico obtenidos a partir del sensor instalado en la perforación costera, los cuales se presentan de manera conjunta con las mediciones de marea.

En términos generales, se verifica una correspondencia entre los eventos de marea alta, el incremento de la CE y el ascenso de nivel hidráulico. En la Tabla 1 se muestran los rangos de variación de altura de marea y nivel hidráulico y la CE para cada evento. Este proceso se manifiesta a través de un incremento abrupto de la conductividad, desde valores de equilibrio cercanos a los $3200 \mu\text{S}/\text{cm}$ hasta llegar valores asimilables a la CE del mar. Luego de cada estímulo, el descenso se manifiesta de manera suave hasta un nuevo ascenso de la marea. En este sentido, se verifica que el tiempo de respuesta entre el ascenso de la marea y el valor máximo de CE se produce en cuestión de horas, en tanto que el lapso temporal hasta alcanzar nuevamente el equilibrio se produce a razón de días.

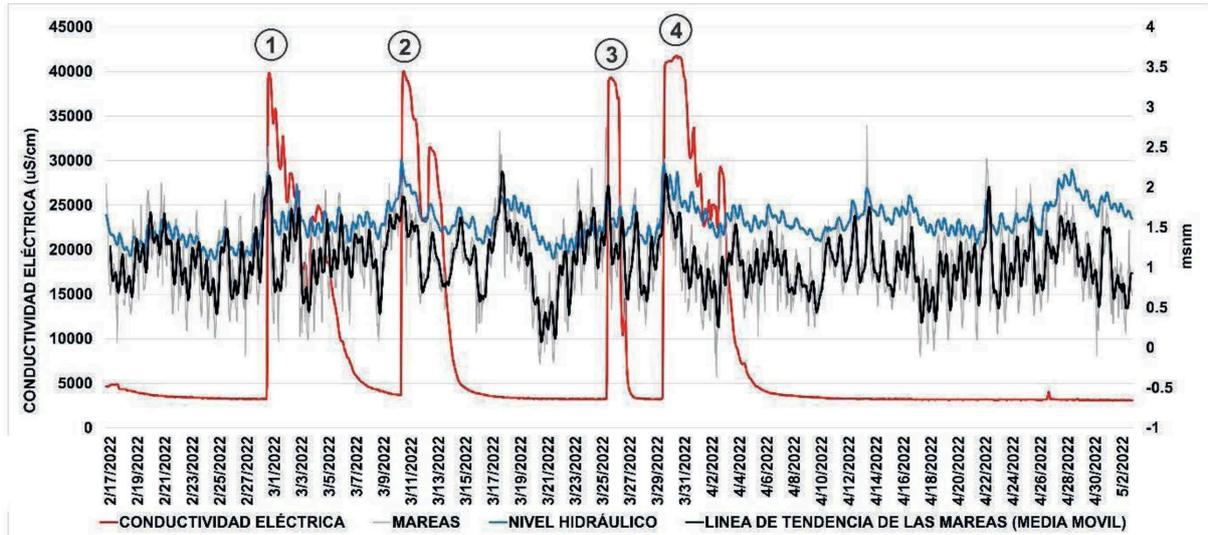


Figura 4. Registros horarios de CE, mareas y nivel hidráulico obtenidos a partir de los sensores instalados en la perforación de monitoreo de la IADAS.

Tabla 1. Eventos de ascenso de marea y sus manifestaciones en término de nivel hidráulico, rangos de variación de la CE y tiempos de respuesta hasta alcanzar el máximo de CE y el equilibrio.

| Fecha y hora | Rango de variación de marea (msnm) | Rango de variación del nivel hidráulico (msnm) | Rango de variación CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Tiempo de respuesta | Tiempo hasta alcanzar el equilibrio |
|------------------------|------------------------------------|--|---|---------------------|-------------------------------------|
| 1/03/2022 8:00 a. m. | 0,54 - 2,51 | 1,47 - 2,17 | 3240 - 39786 | 2 h | 8,5 días |
| 11/03/2022 3:00 a. m. | 1,5 - 2,19 | 1,71 - 2,31 | 3697 - 39603 | 6 h | 5,1 días |
| 26/03/2022 4:00 a. m. | 1,13 - 2,75 | 1,33 - 1,93 | 3250 - 38945 | 8 h | 2,3 días |
| 30/03/2022 11:00 p. m. | 1,15 - 2,36 | 1,28 - 2,26 | 3215 - 41252 | 6 h | 6,7 días |

Otro fenómeno relevante se vincula con el comportamiento medido luego del cuarto evento de marea hasta el final del registro disponible. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, existe una correlación entre el ascenso de la marea y el incremento de las conductividades asociadas al desplazamiento de la IADAS hacia el continente. Sin embargo, y tal como se muestra en la Figura 4, en donde se identifican eventos de marea alta incluso de mayor magnitud a los descriptos para los eventos 1, 2 y 3, este comportamiento no se verifica.

Una posible explicación podría estar vinculada con la evolución de los volúmenes de recarga y agotamiento obtenidos para el período comprendido entre mayo de 2021 a abril de 2022. En términos generales, el área de estudio presenta 7 meses con recarga y 5 meses con agotamiento; esta condición responde a que, si bien la mayor cantidad de precipitaciones se manifiestan durante el verano, el efecto de la evapotranspiración y la demanda hídrica por parte del turismo resultan en valores de agotamiento. De manera opuesta, durante los meses más fríos, debido a una menor evapotranspiración y demanda hídrica, se produce la recarga del acuífero (Figura 5).



Figura 5. Valores de recarga y agotamiento obtenidos para el período mayo 2021 a abril 2022

El análisis de los volúmenes de recarga y agotamiento para la serie 2021/2022 permite advertir que durante los eventos 1, 2 y 3 el acuífero presentaba valores de agotamiento, mientras que, en abril de 2022, las precipitaciones acumuladas (180 mm) resultaron suficientes como para generar excedentes hídricos, resultando en un valor de recarga de 1,10 hm³. De este modo se infiere que el aumento del volumen almacenado podría estar ejerciendo una mayor presión hidráulica sobre la IADAS evitando el desplazamiento de esta hacia el continente.

Un proceso que resulta de interés es la variación de la temperatura del agua subterránea durante los ascensos de marea. Tal como se muestra en la Figura 6, existe una correlación entre los eventos de marea alta y el incremento de la temperatura registrada en el sensor. Este proceso se verifica para los 3 primeros eventos de marea. Sin embargo, para el cuarto evento, ocurrido entre las 6:00 y las 17:00 h, se observa un comportamiento inverso al descrito anteriormente.

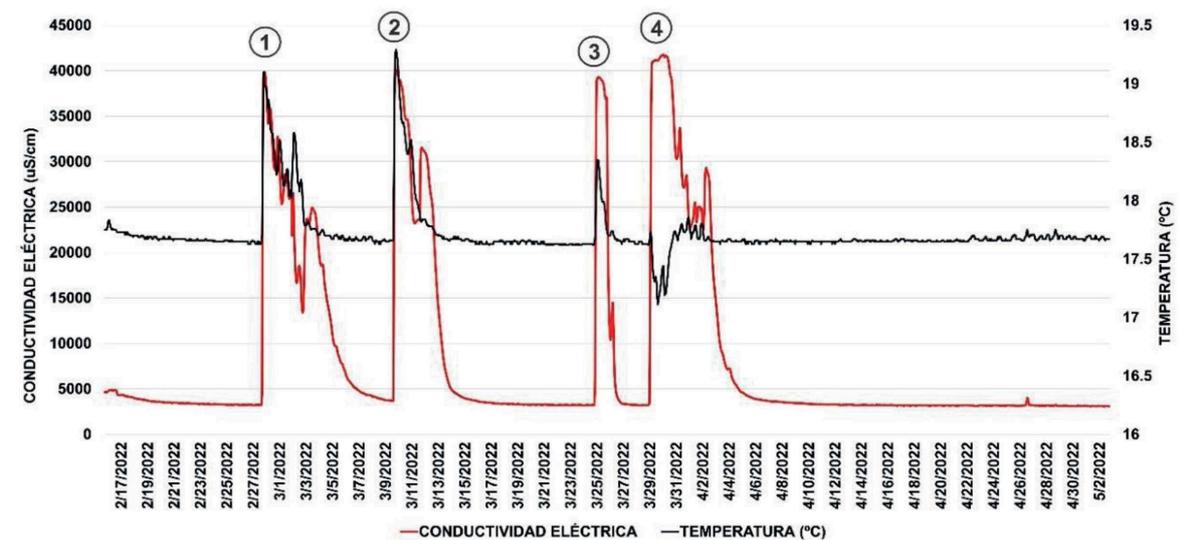


Figura 6. Registros horarios de CE y temperaturas horarias registradas por el sensor instalado en la perforación de monitoreo de la IADAS

Este comportamiento podría vincularse a las condiciones climáticas registradas durante el ascenso de la marea. De acuerdo a los datos aportados por la estación meteorológica de Pinamar, los vientos predominantes se

produjeron del cuadrante WSW, alcanzando valores medios de 20 km/h, y alcanzaron máximos de 45,8 km/h a las 11:30 am. Se infiere que esta condición podría haber generado una mezcla de las aguas oceánicas más profundas y más frías con las aguas superficiales más cálidas. De este modo, el desplazamiento de dichas aguas más frías hacia el continente habría generado una disminución de las temperaturas registradas en el sensor.

CONCLUSIONES

Tal como ha sido demostrado en este artículo, el estudio de la relación entre el agua dulce y salada resulta fundamental para comprender la dinámica de los acuíferos ubicados en sectores costeros. En este trabajo, el análisis de las variaciones de las conductividades en profundidad permitió reconocer la morfología general y el carácter transicional de la zona de interfase agua dulce – agua salada.

A una escala de mayor detalle temporal se verifica el efecto dominante por parte de las mareas y cómo esta última influye sobre la CE, la temperatura y el nivel hidráulico. Asimismo, el carácter permeable de los sedimentos arenosos que componen el subsuelo se pone de manifiesto a partir de una rápida respuesta ante cada evento de marea alta, el cual se produce en términos de horas, mientras que el tiempo de retardo para alcanzar nuevamente el equilibrio requiere de al menos 2 a 8 días.

Por otra parte, la estimación de los valores de recarga y agotamiento mensual permite inferir el efecto de la carga hidráulica sobre la zona de interfase, la cual le otorga una mayor estabilidad ante un evento de marea alta. Estas afirmaciones deberán ser confirmadas a partir de estudios de mayor escala temporal.

En virtud de los resultados obtenidos, y considerando el grado de impermeabilización que la localidad de Pinamar presenta y el efecto que ejerce la recarga en la dinámica de la IADAS, la planificación urbana deberá priorizar e implementar la creación de sitios que favorezcan los procesos de infiltración in-situ para incrementar el almacenamiento subterráneo.

Por último, se concluye que el monitoreo sistemático de las conductividades, las temperaturas, los niveles hidráulicos y su relación con las mareas constituyen indicadores eficaces para evaluar el estado y la evolución de las reservas de agua dulce y deben ser considerados como un insumo básico para la adecuada gestión de los recursos hídricos en sectores costeros.

REFERENCIAS

- Carretero, S., Rapaglia, J., Rodrigues Capítulo, L., y Kruse, E., 2021. Variability of ^{222}Rn in the sandy aquifer of Buenos Aires coast. *Environmental Earth Sciences*, 80(3): 1-14.
- Carretero S., Rapaglia J., Perdomo S., Albino Martínez C., Rodrigues Capítulo L., Gómez L. y Kruse E., 2019. A multi-parameter study of groundwater–seawater interactions along Partido de La Costa, Buenos Aires Province, Argentina. *Environmental Earth Science* 78: 513. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8532-5>
- Consejo Federal de Inversiones, 1993. Estado Actual de las Fuentes Subterráneas en Pinamar y Villa Gesell. Primera Etapa: Pinamar. p. 77.
- González N., 2005. “Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires”. En: *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*, Cap. XXII: 359 - 374. La Plata.
- Kruse E. y Mas-Plá, J., 2009. Procesos hidrogeológicos y calidad del agua en acuíferos litorales. 2009. *Gestión ambiental integrada de áreas costeras*; pp. 29-53.
- Parker G. y Violante R. A., 1989. *Geología y Geomorfología. Regiones I y II. Punta Rasa - Faro Querandí*. Provincia de Buenos Aires. Convenio Consejo Federal de Inversiones y Servicio de Hidrografía Naval, Informe final. p. 141.
- Perdomo S., Rodrigues Capítulo L., Kruse E. E. y Ainchil, J. E., 2013. Aplicación de tomografías eléctricas en la configuración del acuífero costero en un sector oriental de la Provincia de Buenos Aires. In *VIII Congreso Argentino de*

Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea (La Plata, 17 al 20 de septiembre de 2013).

- Rodrigues Capítulo, L., 2015. Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la Provincia de Buenos Aires (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Rodrigues Capítulo, L. y Kruse E.E., 2018. Modelo conceptual de funcionamiento geohidrológico del acuífero costero medanoso. Caso de estudio: Pinamar. El agua subterránea "recursos sin fronteras". Ed. Universidad de Salta. Salta; Argentina, pp. 135 –142.