

25. INFLUENCIA DE LA EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA PLEISTOCENA - HOLOCENA EN LA DINÁMICA DEL ACUÍFERO MEDANOSO COSTERO DE PINAMAR

Rodrigues Capítulo, Leandro, Eduardo E. Kruse y Pablo De Bernardi

Facultad de Ciencias Naturales y Museo - Calle 64 N°3, La Plata (Pcia de Buenos Aires).
Tel: 54-221-4249049. E-mail: Ircapitulo@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN.

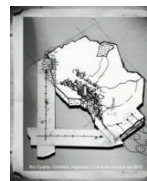
La región costera oriental de la Provincia de Buenos Aires ha sido testigo de numerosos eventos transgresivo-regresivos durante el Pleistoceno y el Holoceno. Estos depósitos se encuentran cubiertos por el cordón medanoso, en el cual se almacena el único reservorio subterráneo de agua dulce. Con el propósito de generar un modelo geomorfológico evolutivo que facilite la comprensión de la dinámica del acuífero costero se analizó el partido de Pinamar. Se ejecutaron perforaciones con profundidades entre 6 y 25 m, interpretándose datos geológicos, imágenes satelitales y perforaciones antecedentes. Además se realizaron relevamientos hidrogeológicos, utilizándose un SIG a los efectos de sistematizar y organizar la información. El modelo evolutivo bosquejado permitió diferenciar 4 estadios sedimentarios principales, el primero vinculado a la ingresión marina; el segundo, regresivo que corresponde a la fase del modelado del relieve Pleistoceno; el tercero vinculado a la instalación de un sistema de barreras transgresivas que aislaron el sistema continental del marino originando un ambiente microtidal y de lagunas internas de baja energía; y el último relacionado con la formación del actual cordón medanoso. Las sucesivas configuraciones geomorfológicas conjuntamente con las características climáticas imperantes durante el Cuaternario, ejercen una influencia directa en el comportamiento hidrogeológico. El cordón medanoso representa una zona de recarga de agua subterránea que es de carácter autóctono directa a partir de los excesos de las precipitaciones. La heterogeneidad litológica vertical y horizontal hace que se detecten diferencias de espesor y permeabilidad de los niveles productivos, pero conformando un sistema hidráulico único. El flujo subterráneo hacia las zonas de descarga genera dos interfases: salobre-dulce hacia el continente y dulce-salada hacia el mar.

Palabras clave: Pleistoceno-Holoceno, acuífero costero, eventos transgresivos-regresivos, Pinamar

ABSTRACT

The eastern coastal region of Buenos Aires Province has suffered numerous transgressive-regressive events during the Pleistocene and Holocene. These deposits are covered by a sand dune barrier in which the unique underground reservoir of fresh water is stored. The Pinamar district was analyzed, in order to generate a geomorphological evolution model that facilitates the understanding of the dynamics of the coastal aquifer. Drillings were executed between 6 and 25 m, interpreting geological data, satellite imagery and drilling history. Furthermore hydrogeological surveys were conducted, using a GIS for the purpose of systematizing and organizing information. The evolutionary model outlined allowed into 4 main sedimentary stages, the first linked to the marine ingression, the second regressive phase corresponding to the Pleistocene relief modeling, the third related to the installation of a transgressive barrier system that isolated the continental system from the microtidal marine environment originating internal lakes of low energy, and the latest related to the formation of the current sand dune barrier. Successive geomorphological settings together with the climatic conditions during the Quaternary, exert a direct influence on the hydrogeological behavior. The coastal fringe represents a recharge zone for the aquifer which feeds directly from rainfall excesses. The horizontal and vertical lithologic heterogeneity allow to recognize differences in thickness and permeability of groundwater production, but forming a single hydraulic system. Groundwater flows to discharge areas generating two interfaces: brackish-freshwater to the mainland and freshwater-saline to the sea.

Keywords: Pleistocene-Holocene, coastal aquifer, transgressive-regressive events, Pinamar



INTRODUCCIÓN

La región costera oriental de la Provincia de Buenos Aires ha sido testigo de numerosos eventos transgresivo-regresivos durante el Pleistoceno y Holoceno. Los depósitos relacionados a tales eventos se encuentran cubiertos por el cordón medanoso costero en el cual se almacena un reservorio de agua subterránea, que resulta la única fuente de agua dulce. El conocimiento de la posición histórica del nivel mar y su relación con los ambientes sedimentarios, la disposición y configuración de las lentes arenosas, y el régimen de recarga del acuífero poroso clástico que se dieron en el área, son necesarios a la hora de analizar el funcionamiento y dinámica actual del reservorio.

El área de estudio (Fig. 1) se ubica geográficamente en el borde oriental de la Pampa Húmeda, abarca una superficie aproximada de 66 km² y corresponde al área denominada por Parker y Violante (1989) como "Cordon Costero medanoso". Esta geoforma se extiende desde Punta Rasa hasta la laguna de Mar Chiquita alcanzando desde 2 hasta 4 km de ancho. Las dos unidades menores que lo conforman han sido denominadas generalmente como Playa y Médanos. La primera se caracteriza por un ancho de 50 a 150 m y presenta pendientes suaves, compuestas granulométricamente por arenas finas a medias (Teruggi 1959) y posteriormente Spalletti y Mazzoni (1979) quienes también realizaron una zonación mineralógica de acuerdo a la latitud. Los médanos poseen alturas que superan los 30 m, tratándose, en sentido general, de médanos transversales, barjanes y en estrella (Bertola *et al.* 2002).

La estratigrafía Pleistocena y Holocena en la llanura costera atlántica bonaerense presenta las complejidades propias del ambiente costero, donde la acción de los procesos marinos han modelado los terrenos preexistentes integrados por sedimentos marinos y continentales más antiguos producto de regresiones y transgresiones ocurridas a raíz de sucesivos eventos glacioeustáticos durante el Cuaternario.

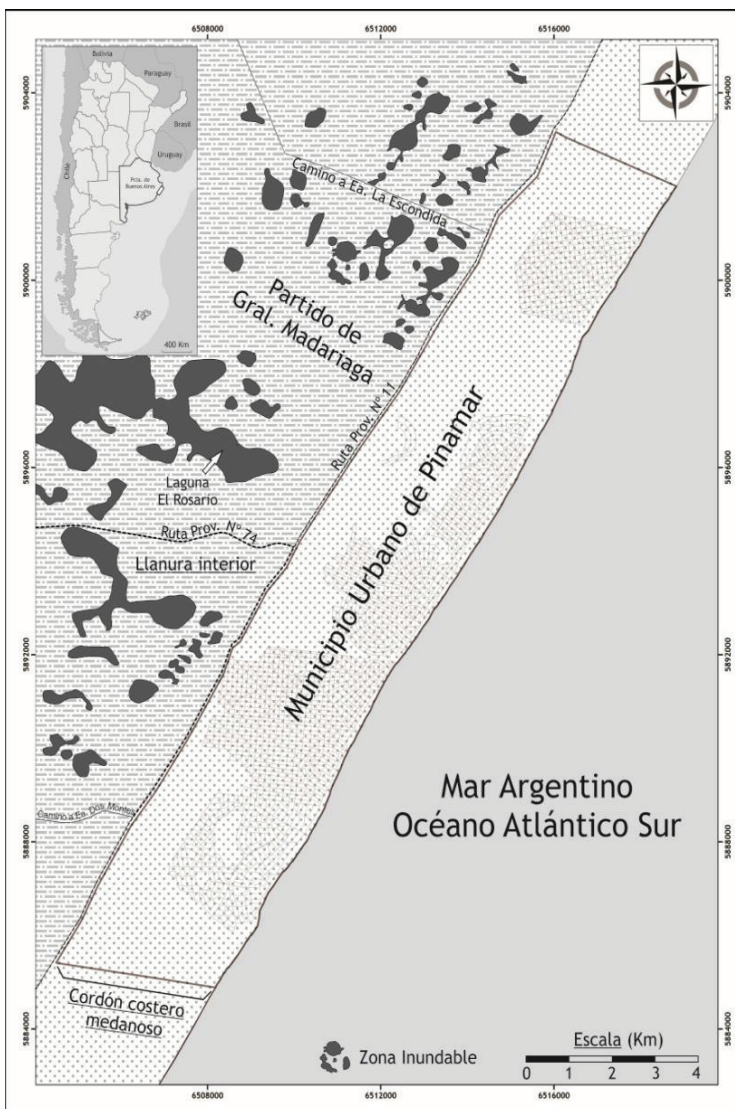
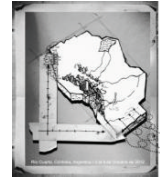


Figura 1. Área de estudio. Partido de Pinamar, Pcia. de Buenos.



El propósito del trabajo es generar un modelo evolutivo conceptual de la zona costera que facilite la comprensión de la dinámica actual del acuífero costero, a partir de la interpretación de información geológica y geomorfológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo al objetivo planteado, se realizaron sondeos con distintas profundidades que oscilaron entre los 6 y los 25 m (Fig. 2). Los sistemas de perforación utilizados fueron manuales y rotativos. De este modo se logró contar con la descripción de aproximadamente 600 metros lineales de perforación y 150 kg de muestras de cutting. Se realizó la descripción litológica y la extracción de muestras de sedimentos que fueron analizadas en gabinete con lupa binocular. La descripción cualitativa y porcentual de los componentes minerales de los sedimentos se realizó a partir de una selección estadística que resultara lo más representativa posible. Por último se extrajeron muestras de agua para su posterior análisis químico en el laboratorio.

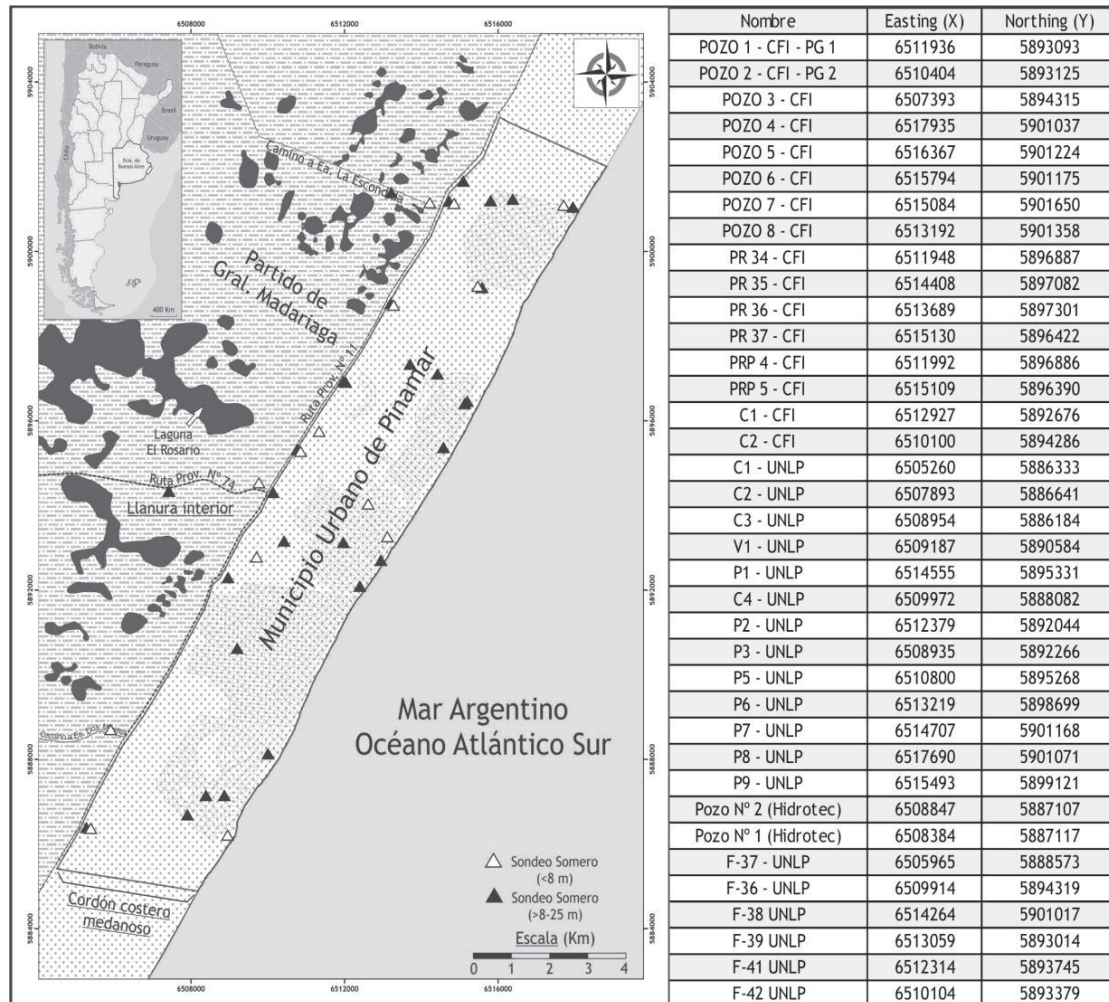
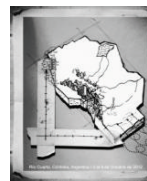


Figura 2. Ubicación, denominación y coordenadas Gauss - Kruger de los sondeos realizados.



Se recopiló información geológica existente sobre el área, y datos de perforaciones realizadas. Los trabajos antecedentes vinculados a las aguas subterráneas surgieron de trabajos realizados principalmente por Gonzalez Arzac *et al.* (1993) e informes inéditos de consultoras. Además se interpretaron imágenes satelitales y se efectuaron relevamientos hidrogeológicos tradicionales (medición de niveles), utilizándose un Sistema de Información Geográfica a los efectos de sistematizar y organizar toda la información obtenida.

RESULTADOS

El análisis de estos datos permitió bosquejar la evolución del sistema geomorfológico, deduciendo la presencia de variados ambientes sedimentarios, entre ellos, en el sentido que expresan Nichols y Allen (1981), deltas de inundación fluvial, playas y canales de marea, barreras arenosas transgresivas, pantanos y lagunas costeras parcial o totalmente aisladas al mar.

Las profundidades de explotación del acuífero alcanzan un máximo de 25 m, incluyendo la secuencia sedimentaria hasta esa profundidad:

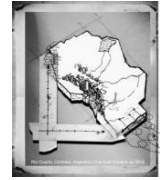
- A. Arenas castañas finas a medias con conchilla triturada y potencias que oscilan entre 2 y 15 metros, las cuales constituyen el principal reservorio de agua dulce.
- B. Arenas finas a medianas arcillosas castaño rojizas, en donde la arcilla conforma, en mayor o menor proporción, la matriz del sedimento.
- C. Arcillas grises azuladas plásticas con potencias que oscilan desde los pocos centímetros hasta 2 o 3 metros en casos excepcionales. En la mayoría de los casos estudiados se encuentran acompañados por sedimentos finos calcáreos. En otros, es notable la presencia de fauna marina y de agua dulce que acompañan estos depósitos.
- D. Horizontes orgánicos con restos leñosos, los cuales presentan su mayor expresión en las zonas más continentales aledañas a la ruta interbalnearia (Ruta Prov. N° 11),
- E. Conchillas de gran tamaño con mayor o menor grado de fragmentación que pasan transicionalmente a arenas conchilíferas constituyendo potenciales reservorios de agua dulce.

De acuerdo a esta secuencia se deduce que la evolución durante el Pleistoceno-Holoceno estuvo vinculada a las oscilaciones glacioeustáticas, en respuesta a las condiciones climáticas imperantes. La alternancia de períodos glaciales e interglaciales indujo la ocurrencia de regresiones y transgresiones que modelaron el sustrato erosionándolo en parte y superponiéndole nuevos sedimentos litorales.

El esquema planteado se resume en 4 estadios principales que han sido representados en la Figura 3.

El primer estadio corresponde a una facie transgresiva (Figs. 3a y 3b) generando dos procesos en su progresivo ascenso, uno erosivo (acantilamiento) y uno de acumulación en donde se depositan sedimentos limo-arcillosos. Las intercalaciones más gruesas en forma de lentes areno-conchilíferas están relacionadas a fenómenos excepcionales de tormenta y a la propia dinámica transgresiva del nivel del mar.

En el segundo estadio se produce el descenso relativo del nivel del mar (Fig 3c y 3d), que trajo aparejado la erosión y el modelado, mayormente eólico de esa superficie emergida. Las características climáticas más frías y secas, la presencia de cursos de agua transitorios o efímeros que descargaban hacia el mar, pueden haber generado deltas mareales en las zonas más próximas a la línea de costa, mientras que en las zonas más internas, canales de marea y algunos pantanos de escaso desarrollo. Las condiciones geomorfológicas y climáticas permiten inferir procesos de infiltración de menor magnitud que los actuales debido a las menores precipitaciones,



el carácter fino de los sedimentos, el aumento del escurrimiento superficial y la mayor evapotranspiración. Tales fenómenos habrían favorecido el enriquecimiento salino de las aguas subterráneas, este tipo de comportamientos son análogos a los que actualmente ocurren en la llanura interior dentro del partido de Madariaga. En este mismo contexto se infiere que la posición de la interfase agua dulce – agua salada estaría ubicada en una posición más distal que la actual y que el espesor de la zona de mezcla habría sido menor que el actual debido al menor contraste de salinidades. El nivel del mar continuó con su descenso hasta ubicarse en una cota que ha sido estimada en los -120 y -150 m por debajo del nivel actual (Violante *et al.* 2001).

En el tercer estadio el nivel comenzó nuevamente su ascenso (18.000 - 6.000 años AP) durante la última deglaciación (Figs 3e y 3f), el mar comenzó nuevamente a invadir el ámbito actual de Plataforma, provocando el modelado del sustrato Pleistoceno a la vez que se formaron barreras areno-conchilíferas en facies transgresivas. Estas barreras, por un lado, avanzaron dejando a su paso un espeso manto de arenas, generando por detrás de ellas un ambiente de lagunas costeras y costas microtidales. Dentro de este ambiente, el encuentro de las aguas fluviales y las marinas habría generado una zona de turbidez, que sumado a los procesos de floculación, habría depositado los sedimentos arcillosos grises oscuros. Por otra parte, la existencia de ambientes aislados de baja energía, sumado al aumento progresivo de las precipitaciones y las temperaturas que acompañaron a este período, habrían favorecido el desarrollo de incipientes suelos y pantanos. Este evento es relevante a la hora de interpretar los depósitos finos encontrados en las perforaciones realizadas en las zonas aledañas a la ruta interbalnearia. El carácter granulométrico de estas unidades adquiere gran importancia, ya que de ellas depende el grado de conexión hidráulica entre las unidades acuíferas. Dentro de este esquema también se contempla la presencia de grandes lentes arenosas que se vincularían tanto con eventos excepcionales de tormenta, como también con fenómenos intermitentes propios de la dinámica transgresiva de las barreras en su avance hacia el continente.

Como ha sido mencionado anteriormente, el ambiente dominante se correspondería al de lagunas internas y costas microtidales (Figs. 3e y 3f) parcialmente aisladas en donde la actividad marina, si bien no define todos los rasgos geomorfológicos presentes, predomina sobre los procesos continentales, ya sea por la acreción de las barreras areno-conchilíferas en sentido vertical y por lo tanto el aislamiento del sistema interno, como también la creación de aperturas temporales de canales que permiten el ingreso de agua de mar al sistema de lagunas internas o albuferas entre otras geoformas.

El último estadio está relacionado con la instalación de la cadena de médanos costeros actuales (Figs. 3g y 3h), los cuales son producto del constante aporte sedimentario proveniente desde el Sur y que es transportado por efecto de la deriva litoral.

El aumento del régimen de lluvias habría favorecido los procesos de infiltración, los cuales propiciarían el ascenso del nivel freático y por ende el desarrollo de vegetación que progresivamente, fijaría los médanos. La presencia de extensos bancos de arena favoreció la existencia de zonas de infiltración por donde el acuífero freático se recargaba con agua de lluvia conformando una lente de agua dulce. Debido al aumento de la carga hidráulica del agua dulce es posible que haya producido un aumento del espesor y movilización de la interface (dulce-salada) hacia zonas más distales. En este mismo sentido, se habría producido una manifestación de la interface (dulce-salobre) hacia regiones más continentales.

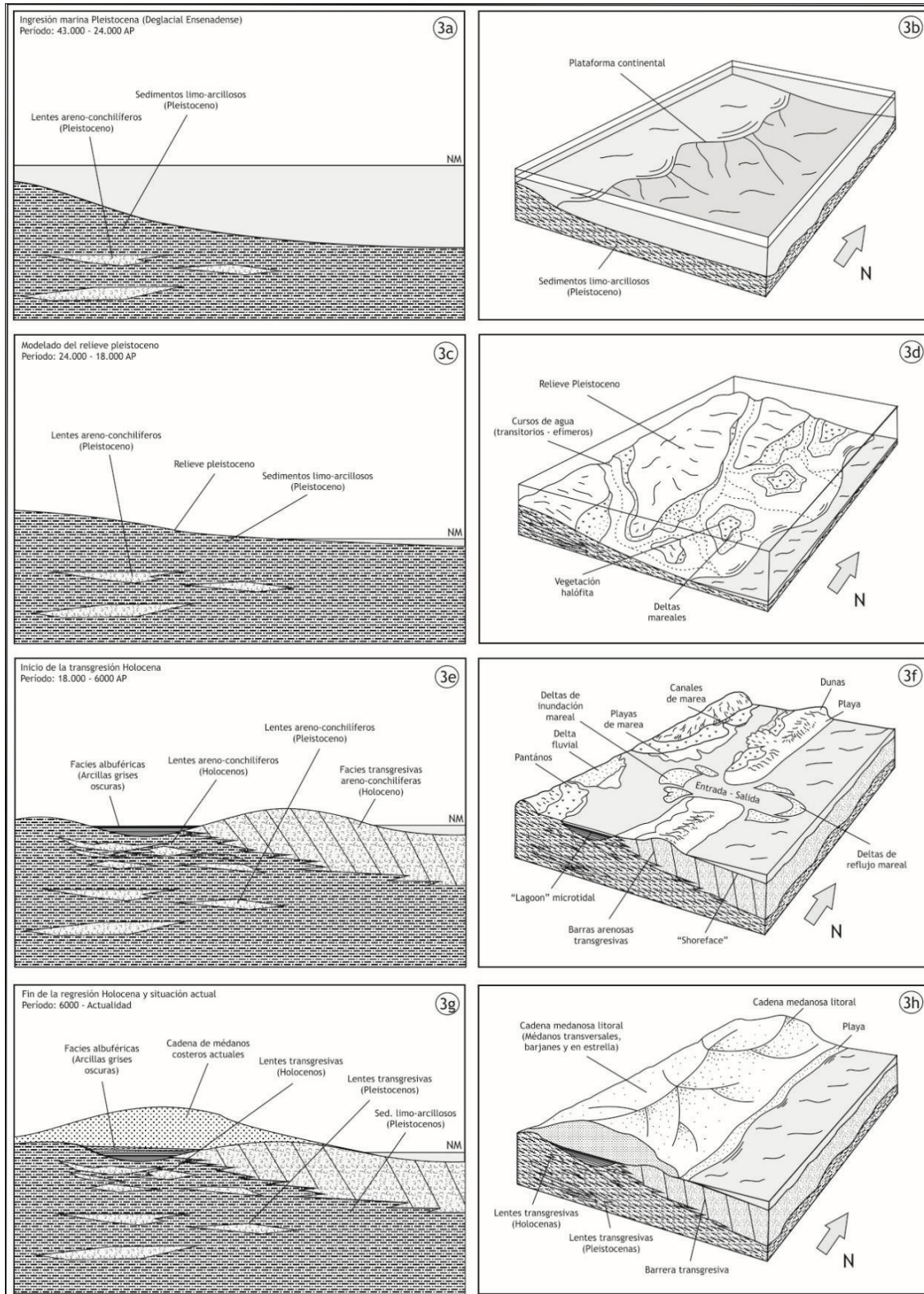
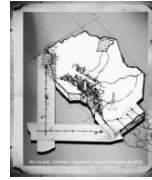
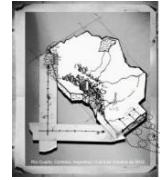


Figura 3. Modelos paleoambientales del área de estudio. (NM: Nivel del mar).



Los relevamientos hidrogeológicos (medición de niveles y muestreos) han permitido verificar las hipótesis que se plantean acerca del funcionamiento actual de las aguas subterráneas de acuerdo a la evolución geomorfológica (Fig. 4). En el mapa de flujo subterráneo (Fig. 5) se reconoce una divisoria de agua subterránea en coincidencia con la posición topográficamente más alta del cordón medanoso. Por otra parte se deduce que alta permeabilidad de los terrenos que lo componen, respecto a sus contrapartes continentales favorecen la recarga autóctona y exclusivamente a partir de precipitaciones (894 mm anuales). Otra evidencia en el mismo sentido está dada por la composición química del agua, que se relacionan a tipos bicarbonatados cálcico – sódicos, con valores de conductividad eléctrica que oscilan entre los 295 y 804 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La presencia de áreas medanosas no forestadas, sumado a las condiciones templadas y húmedas actuales, favorecen los procesos de infiltración a un sistema subterráneo litológicamente heterogéneo en sentido horizontal y vertical. Las direcciones de flujo subterráneo estarán en función de las diferencias de permeabilidad de los sedimentos atravesados, conformando un sistema acuífero único interconectado a través de aquellas capas que poseen mayor permeabilidad y que han sido depositadas durante los eventos predominantemente transgresivos. En la práctica esta particularidad se manifiesta en las perforaciones de explotación, que aun encontrándose muy próximas, muestran diferencias significativas en la calidad y producción a distintas profundidades.

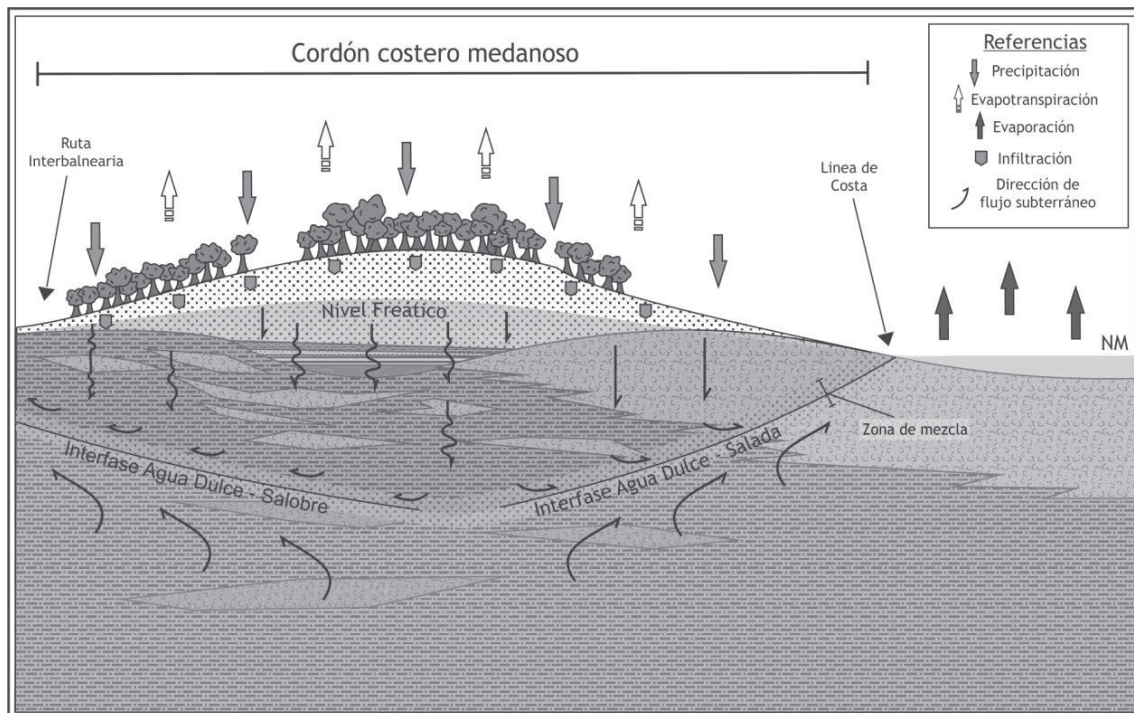
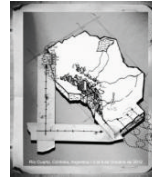


Figura 4. Modelo hidrodinámico conceptual del cordón medanoso en el área de estudio.

El mapa de flujo subterráneo también muestra el sentido regional de escurrimiento, con la descarga se produce hacia el mar y hacia el continente (Fig. 5). En esos sentidos de flujo se reconoce la existencia de una composición química del agua subterránea distinta a la almacenada en el cordón medanoso. Las conductividades eléctricas del agua son fuertemente contrastantes en la llanura interior (hacia el límite occidental) y en las proximidades de la playa (límite oriental) con valores que alcanzan los 11.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 42.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, presentándose

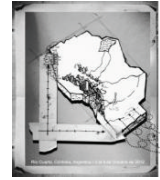


como aguas cloruradas sódicas. Ello pone en evidencia que se generan dos interfaces (salobre – dulce – salada) que limitan el agua dulce del acuífero del cordón medanoso.

La forestación exótica, de mayormente coníferas, introducida durante los últimos 100 años, ha generado una modificación del balance hidrológico, encontrándose diferencias en los valores de los excesos hídricos obtenidos de acuerdo a la ecuación propuesta por FAO Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998) de 471 mm/año y 261 mm/año para el suelo medanoso desnudo y bajo bosque respectivamente (Rodriguez Capitulo *et al.* 2011). A pesar de las variaciones señaladas, aún en los sectores forestados el cordón medanoso continúa evidenciándose como un área de recarga de la lente de agua dulce que se desarrolla en el cordón medanoso.



Figura 5. Mapa de flujo subterráneo para el Partido de Pinamar.



CONCLUSIONES

La evolución geomorfológica tiene una influencia directa en el comportamiento de las aguas subterráneas del ambiente costero analizado. El esquema paleoambiental propuesto responde a una sucesión de ambientes vinculados a depósitos transgresivos y regresivos ocurridos durante el Pleistoceno y el Holoceno. Se reconocen 4 estadios, 2 transgresivos y 2 regresivos, el primero vinculado a la ingresión marina, el segundo, regresivo que corresponde a la fase del modelado del paleorelieve Pleistoceno; el tercero asociado con la instalación de un sistema de barreras transgresivas que aíslan el sistema continental con el marino, originando un ambiente microtidal y de lagunas internas de baja energía; y el último relacionado con la formación del actual cordón medanoso.

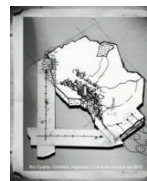
El mapa de flujo subterráneo permite verificar la existencia de una zona de recarga de agua subterránea en el cordón medanoso, lo cual se asocia a su condición geomorfológica dada por su elevada posición topográfica, la alta permeabilidad de los sedimentos y la carencia de una red de escurrimiento superficial. La existencia de áreas sin forestación y las condiciones templadas húmedas, favorecen que dicha recarga sea autóctona y directa a partir de los excesos de las precipitaciones.

La heterogeneidad litológica derivada de la evolución geomorfológica controla el flujo del agua que infiltra hacia el subsuelo. Dicha heterogeneidad hace que la correlación areal sea compleja y que se manifiesten diferencias de espesor y permeabilidad de los niveles productivos en cortas distancias a diferentes profundidades. La baja salinidad del agua del cordón medanoso (aguas bicarbonatadas calcio sódicas con conductividades eléctricas entre 290 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) muestran un abrupto contraste con el agua que se encuentra en el sentido de flujo subterráneo hacia la zona de descarga en la planicie interior (agua clorurada sódica de 11300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y hacia el mar (clorurada sódica de 42.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Ello refleja la existencia de dos zonas de interfases (salobre-dulce y dulce-salada).

El conocimiento de la evolución paleoambiental de la zona facilita la interpretación del comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del sistema subterráneo, lo cual es fundamental para generar pautas para la gestión sustentable del recurso hídrico.

REFERENCIAS

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage. Paper N° 56, 290 p.
- Bertola, G. R.; Isla, F. I.; Cortizo, L. C. y Turno Orellano, H. A. 2002. Modelo sedimentario de la barrera medanosa al norte de Villa Gesell (Provincia de Buenos Aires) - de aplicación hidrogeológica. Revista de la Asociación geológica Argentina. 9 (2): 109-126
- González Arzac, R., Pérez Spina, R., Garay, R., Vizcaino, A., Remorini, G., Campos, A., Rascovsky, L., García, R. & Bravo Molino, R. 1993. Estado Actual de las fuentes subterráneas en Pinamar y Villa Gesell (Primera etapa: Pinamar). Consejo Federal de Inversiones. Administración General de Obras Sanitarias. 71p
- Nichols M. M. y Allen, G. 1981. Sedimentary processes in coastal lagoons. In Coastal lagoon research, present and future. pp 27-80. Paris: UNESCO. Technical Papers in Marine Science, 33.
- 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. 141 pp.
- Rodriguez Capitulo, L y Kruse E. 2011. Balance hidrológico en un área costera medanosa con forestación. Caso de estudio: Partido de Pinamar (Provincia de Buenos Aires). VII Congreso Argentino de



- Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea. Hidrogeología regional y exploración hidrogeológica. Actas del taller 2: 80-87, Salta.
- Spalleti, L. y Mazzoni, M. 1979. Características granulométricas de arena de playa frontal, playa distal y médano del litoral bonaerense. Revista de la Asociación Geológica Argentina 34 (1): 12-30.
- Violante, R., G. Parker y J. L. Cavallotto. 2001. Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la Bahía Samborombón y la laguna Mar Chiquita durante el Holoceno. Revista de la Asociación Geológica Argentina 56 (1): 51-66.
- Teruggi, M, 1959. Las arenas de la costa de la Provincia de la costa de Buenos Aires entre el Cabo de San Antonio y Bahía Blanca. Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigación Tecnológica 2 (77): 1-37.