

Impacto de la urbanización en la infiltración en un área costera, Argentina

• Silvana Carretero* • Eduardo Kruse •
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Carretero, S. & Kruse, E. (noviembre-diciembre, 2014). Impacto de la urbanización en la infiltración en un área costera, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 5-24.

En la costa nororiental de la provincia de Buenos Aires, Argentina, se analizó la evolución de la duna costera, los cambios en el uso del suelo consecuencia de la urbanización y los efectos sobre la infiltración al acuífero freático. A partir de fotografías aéreas e imagen satelital (1958-2005) se evaluaron las modificaciones en el sector norte, central y sur, teniendo en cuenta el estado de la duna (activa o fija). La cartografía fue trabajada bajo ArcGis v9.2 utilizando *Spatial Analyst Tools*. Se realizaron censos de perforaciones para construir mapas isofreáticos y de isovariación entre 2006 y 2007. Se efectuaron balances hídricos (1959-2011), cuyos excesos (430 mm/año) se transforman directamente en recarga al acuífero. Entre 1958 y 2005, la duna activa se redujo un 4% en el sector norte, 16% en el central y 24% en el sur. Se analizó temporalmente la relación entre urbanización e infiltración en el sector central, considerando tres zonas con diferentes respuestas ante la infiltración (zonas 1, 2 y 3). La zona de duna natural (zona 2) desapareció a partir de 1984, mientras que las zonas con diferentes grados de urbanización (zonas 1 y 3) incrementaron su superficie. Asociado con estas variaciones, la recarga disminuyó de 2.31 hm³ en 1958 a 1.19 hm³ en 2005, resultando en una reducción del 48% en 47 años. El análisis presentado es de utilidad para los tomadores de decisiones a la hora de establecer pautas de manejo para el ordenamiento territorial y uso sustentable del recurso hídrico.

Palabras clave: dunas costeras, acuífero costero, uso del suelo, recarga, Partido de La Costa, Argentina.

Abstract

Carretero, S. & Kruse, E. (November-December, 2014). Impact of Urbanization on Infiltration in a Coastal Area, Argentina. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(6), 5-24.

In the northeastern coast of the Province of Buenos Aires, Argentina, the evolution of the coastal sand-dune, land-use changes due to urbanization and the effects on infiltration to the phreatic aquifer were analyzed. Taking into consideration the nature of the dunes (active or fixed) the modifications in the northern, central and southern sectors were evaluated from aerial photographs and satellite imagery (1958-2005). The cartography was processed with ArcGis v9.2 using the *Spatial Analyst Tools*. Well measurements were carried out to draw isophreatic and isovariation maps between 2006 and 2007. Water balances (1959-2011) were carried out, with the water surplus (430 mm/year) being directly transformed into recharge to the aquifer. Between 1958 and 2005, the active dune was reduced by 4% in the northern sector, 16% in the central sector and 24% in the southern sector. The relationship between urbanization and infiltration over time in the central sector, considering 3 zones with different responses to infiltration (zones 1, 2 and 3), was analyzed. The zone with a natural dune (zone 2) has disappeared since 1984, while the zones with different degrees of urbanization (zones 1 and 3) have increased in surface. Associated with these variations, recharge decreased 2.31 hm³ in 1958 and 1.19 hm³ in 2005, resulting in a reduction of 48% over 47 years. This analysis is useful for decision makers when establishing land-use management guidelines and a sustainable use of the water resources.

Keywords: Coastal dunes, coastal aquifer, land-use, recharge, Partido de La Costa, Argentina.

Recibido: 01/05/13

Aceptado: 11/06/14

Introducción

Las dunas costeras se distribuyen en una amplia variedad de regímenes climáticos y su formación depende de la disponibilidad de arena y de los vientos, participando el desarrollo de la vegeta-

ción en su fijación (Ley Vega de Seoane, Gallego-Fernández, & Vidal-Pascual, 2007). En muchos casos, estos ambientes han sido degradados por la actividad del hombre, que se ha incrementado de forma significativa en los últimos 50 años, tal como ha sucedido en Nueva Zelanda y Holan-

da, donde muchos de los sistemas costeros se encuentran alterados de manera irreversible o han desaparecido (Martínez, Psuty, & Lubke, 2008). Las dunas costeras comprenden aproximadamente el 15% de las costas del mundo; las mayores barreras coinciden con márgenes tectónicamente estables, como la costa este de los Estados Unidos (3 100 km) y la costa del Golfo de México (1 600 km). También existen cadenas de barreras a lo largo de la costa este de Sudamérica (960 km), la costa este de la India (680 km), el Mar del Norte en Europa (560 km), el este de Siberia (300 km), y el norte de Alaska (900 km) (Fitzgeralds & Buynevich, 2006).

Las características morfológicas y la capacidad de infiltración de las dunas costeras hacen que representen áreas de recarga del agua subterránea y constituyan reservorios de agua dulce. En muchos casos, estos reservorios son la única fuente de abastecimiento a poblaciones costeras y actúan como barreras que protegen de la intrusión marina (Martínez & Vázquez, 2006).

Existen ejemplos de costas arenosas donde los acuíferos han sido estudiados, monitoreados y manejados, tal como en Holanda, Bélgica, el sur de Italia y noreste de España. Muchas veces los acuíferos costeros son de pequeña magnitud, pero adquieren significación para cubrir las necesidades humanas, que van desde la urbanización hasta la irrigación, como en el caso del Mediterráneo (Custodio, 2010).

Los acuíferos costeros tienen ciertas características que los hacen relevantes desde el punto de vista de la génesis y el funcionamiento de los espacios naturales relacionados con ellos. Suelen ser medios de elevado dinamismo morfológico en permanente evolución. Ello ocasiona cambios morfológicos (los de menor escala, perceptibles a escala temporal humana) que generalmente inducen cambios en la configuración de las redes hidrográficas y su relación con las aguas subterráneas: ubicación y/o extensión de las zonas de recarga y descarga del acuífero, cuantía de ambos términos, trazado y caudales de los cauces, etc. (Manzano, 2002).

El uso del suelo, particularmente en zonas urbanas y su relación con la cantidad y calidad de las aguas subterráneas ha sido extensamente abordado (Bellot, Bonet, Peña, & Sánchez, 2007; Houlahan & Findlay, 2004; Kim, 2004; Kim *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2005; Wang, 2001; Zuquette, Pejon, & Dos Santos-Collares, 2004). La influencia general que produce una urbanización en el ciclo hidrológico incluye el incremento del escurrimiento superficial por techos, veredas, calles, etc., que puede drenar hacia la red de conductos o hacia un cuerpo receptor principal (Basile & Riccardi, 2000) la modificación de las fluctuaciones naturales de los niveles de agua subterránea (Batra & Semenov, 2008), la disminución de la infiltración natural y la alteración de los procesos de escurrimiento superficial (Kruse *et al.*, 2004).

Si bien existe la asunción de que la recarga relacionada con las precipitaciones disminuye debido al incremento de las superficies impermeables en un área urbana, distintos estudios describen que puede mantenerse o aumentar, a pesar del incremento de las áreas casi impermeables. El agua infiltrada provendría de superficies con permeabilidad secundaria (pavimento, veredas, estacionamientos), estanques de infiltración, riego, pérdidas del sistema de saneamiento y de red de distribución de agua potable (Lerner, 2002; Lerner & Barrett, 1996; Hibbs & Sharp, 2012; Sharp, 2010; Sharp, Krothe, Mather, Garcia-Fresca, & Stewart, 2013; Wiles & Sharp, 2008). Sin embargo, Seiler y Gat (2007) exponen otros estudios donde reconocen una disminución de más del 10% en la recarga debido a drenajes que descargan en el mar.

En Sudamérica, los acuíferos en dunas costeras se corresponden con los depósitos de la costa atlántica (Rebouças, 1999). Bocanegra *et al.* (2010) indican la presencia de pequeños acuíferos clásticos alojados en dunas, de interés local, que son reservorios estratégicos de agua y resaltan que los problemas más graves de abastecimiento se manifiestan en acuíferos costeros localizados en áreas altamente

pobladas del sudeste de Brasil, extendiéndose hacia el noreste de Uruguay (Almagro & Custodio, 2004).

La costa oriental de la Provincia de Buenos Aires puede incluirse dentro de las características previamente mencionadas. Desde mediados del siglo XXI, esta región ha experimentado un fuerte incremento demográfico, con un proceso de urbanización caótico y expansión de actividades económicas especialmente relacionadas con las numerosas localidades balnearias, lo que condujo a un mayor requerimiento de suministro de agua dulce (Kruse, Carretero, Pousa, & Guaraglia, 2012). Este crecimiento urbano ha contribuido a modificar el medio y, por consiguiente, la distribución en el uso del suelo y en el comportamiento hidrológico. En esta región, la única fuente de agua potable (subterránea) presenta un desarrollo escaso y está restringida a la capa freática situada en la franja de dunas (Carretero, 2011). Además del factor antropogénico, esta región resulta vulnerable a la erosión costera e intrusión salina especialmente relacionada con olas de tormenta de alta energía asociadas con fuertes vientos (sudestadas) (Pousa *et al.*, 2007) y a sobreexplotación del recurso. Otro factor a tener en cuenta es el aumento del nivel del mar relacionado con el cambio climático, el cual afectaría la hidrogeología de la región a futuro (Carretero, Rapaglia, Bokuniwicz, & Kruse, 2013a).

En la costa arenosa bonaerense resulta de utilidad establecer las relaciones entre los cambios en el uso del suelo, y la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, debido a que el aumento de la población estable, junto con el ingreso de los turistas en los meses de verano, está íntimamente ligado con el consumo y manejo de las reservas de agua.

En el área de estudio, los procesos de urbanización, destrucción de dunas e impermeabilización del terreno afectan el régimen de las aguas subterráneas, como consecuencia de la disminución de la infiltración y la restricción de las áreas de

recarga (Carretero, Kruse, & Forte-Lay, 2008; Pousa *et al.*, 2007). El proceso de urbanización en distintos grados, que trae aparejada la disminución de las posibilidades de infiltración de los excesos de agua, restringe las áreas de recarga natural del acuífero y, por consiguiente, las reservas de agua dulce disponibles.

La falta de información hidrogeológica es una problemática que afecta el estudio, conocimiento y entendimiento de los acuíferos costeros de Sudamérica. Bocanegra *et al.* (2010) señalan la falta de estudios de caracterización que apoyen la planificación y gestión de los recursos, y la falta de redes de observación. En la República Argentina, según un informe sobre la gestión del agua (Planas, Gaviño-Novillo, Mendiburo, Calcagno, & Urbano-Jáuregui, 2000), no existe una base de datos y un sistema de información sobre los recursos hídricos tanto en el ámbito nacional como en las provincias, que dé sustento a la gestión.

La costa de la provincia de Buenos Aires no es ajena a esta situación; la falta de información hidrogeológica tanto histórica como actual, y la ausencia de una red de monitoreo integral en el ámbito regional hacen necesario el uso de herramientas y metodologías, como imágenes satelitales y/o fotografías aéreas, para reconocer las variaciones en los recursos hídricos, metodología que data ya de varias décadas de aplicación (Byrne, Crapper, & Mayo, 1980), incluyendo el análisis de variaciones en regiones costeras (Huang, Gilmore-Pontius, Li, & Zhang, 2012; Kuleli, Guneruglu, Karsli, & Dihkan, 2011; Ray, Pijanowski, Kendall, & Hyndman, 2012; Shalaby & Tateishi, 2007).

Debido a las características mencionadas, se propone estudiar la evolución de la duna costera junto con los cambios en el uso del territorio, consecuencia del desarrollo poblacional y los efectos sobre la infiltración que alimenta al acuífero freático. Se postula que el uso de imágenes satelitales y fotografías aéreas, complementado con el trabajo de campo, resultaría una herramienta de utilidad que serviría como base en estudios hidrogeológicos en donde se contemplan

los cambios en el uso del suelo. También se propone comprobar que en el caso de la costa arenosa bonaerense, el efecto de la urbanización lleva a una disminución en las reservas de agua disponible.

Área de estudio

El área de estudio abarca la localidad de San Clemente del Tuyú, en la costa nororiental de la Provincia de Buenos Aires, Argentina ($36^{\circ} 22'$ latitud S, $56^{\circ} 44'$ longitud O) (figura 1). El ambiente pertenece a la región costera (González, 2005), en donde las características geomorfológicas condicionan el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico de las aguas subterráneas (Carretero, Dapeña, & Kruse, 2013b). Se reconocen dos ambientes geomorfológicos: la llanura deprimida y el cordón costero (figura 1).

La llanura deprimida se encuentra abierta en el sector norte y se comunica con el estuario del río de La Plata en la bahía de Samborombón. El drenaje se efectúa por el arroyo San Clemente, a través de canales de marea, en los cuales se desarrollan cangrejales. En la zona de Punta Rasa puede observarse la desembocadura de los canales de marea, áreas inundables por la influencia mareal. En el sector sur, este ambiente se manifiesta mediante la presencia de bajos que, a su vez, resultan fácilmente inundables debido a las altas precipitaciones y al ascenso de los niveles freáticos.

En el cordón costero se ha incluido la duna propiamente dicha que se vincula hacia el este con la playa. La zona de playa es rectilínea, tiene entre 50 y 150 m de ancho, con pendientes suaves hacia el este; las arenas son de finas a medias, con presencia de fragmentos de valvas. Las dunas que se encuentran emplazadas al

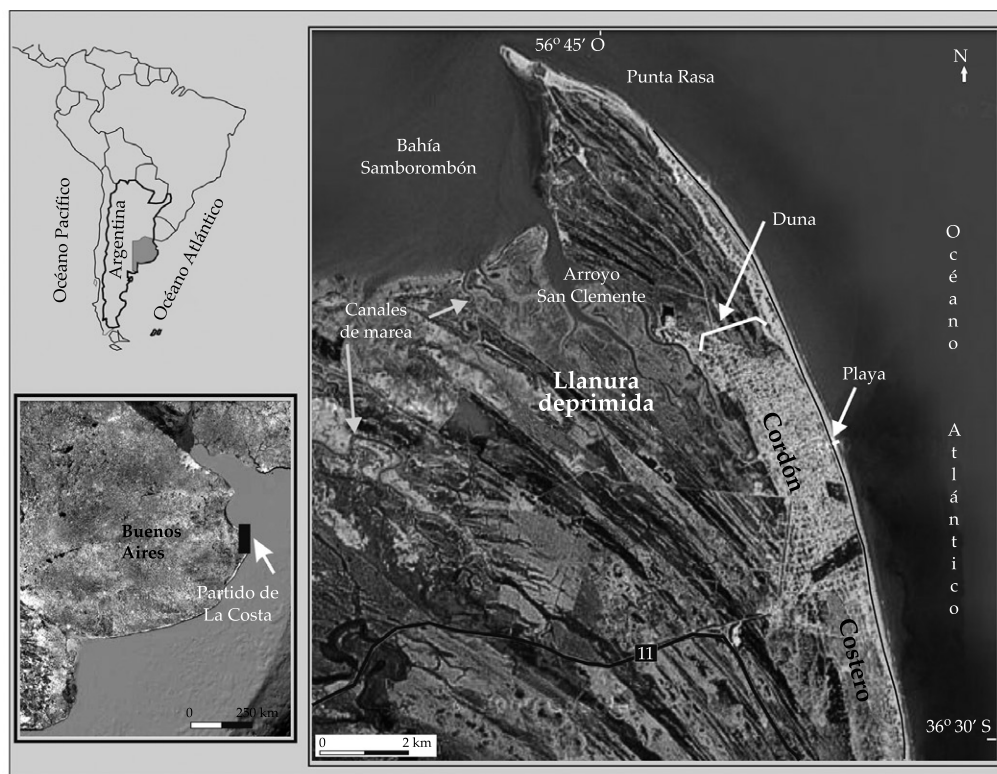


Figura 1. Mapa de ubicación y ambientes geomorfológicos en el área de San Clemente del Tuyú.

oeste de la playa que les da origen son bajas (superan levemente los 3 msnm) y fijadas por escasa vegetación. Su granulometría es de arenas finas y presentan un crecimiento general del tamaño de grano de norte a sur (Spalletti & Mazzoni, 1979).

En las dunas que conforman un cordón paralelo a la costa, el agua subterránea se dispone en lentes de agua dulce limitados hacia el oeste por el agua salobre de la llanura deprimida y hacia el este por el agua de mar. Las reservas de agua dulce son limitadas y su alimentación está directamente relacionada con los procesos de infiltración de los excesos de las precipitaciones (Carretero, 2011). La población actual es del orden de los 12 000 habitantes (INDEC, 2010), que dependen en un 100% del acuífero costero para suplir la demanda de agua potable. El desarrollo turístico es importante, con muy alta actividad en la época estival, en la cual la población puede multiplicarse por cinco. A su vez, la aparición de nuevas ofertas de turismo en la zona produce un aporte constante en el resto del año, pero por cortos periodos de estadía.

El clima es húmedo, mesotermal (templado), con nulo a pequeños déficit de agua, según la clasificación de Thornthwaite. La precipitación media anual está en el orden de 1 000 mm, donde el 60% ocurre de octubre a marzo. La temperatura media anual es de 14.5 °C, la humedad relativa promedio es del 85% y la frecuencia de vientos es muy variable, aunque predomina la dirección este.

Metodología

Para abordar la evaluación de los efectos sobre la infiltración que tiene la evolución de la duna costera, se planteó un análisis en sucesivas aproximaciones, partiendo de una situación regional, para alcanzar una verificación en el nivel local.

En el ámbito regional se efectuaron tareas de relevamiento e interpretación de rasgos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos. A partir de la observación y el análisis de las

fotografías aéreas de 1958 del Servicio de Hidrografía Naval (Argentina), de 1984 del Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires, e imagen satelital de 2005 de *DigitalGlobe Google Earth*, se reconocieron diferentes usos del suelo y se observó la evolución de la duna a través del tiempo. También se definió la relación entre los efectos naturales y el avance de la urbanización.

Tanto las fotografías aéreas como las imágenes satelitales fueron georreferenciadas en *ArcGis v9.2*. Para realizar el análisis de la distribución territorial, se han digitalizado manualmente las zonas correspondientes a los ambientes geomorfológicos (llanura deprimida, duna fija, duna activa y playa), de acuerdo con las características observadas en las fotos, imágenes y trabajo de campo. Luego de que los polígonos fueran definidos, se utilizó la herramienta *Calculate Geometry*, y así obtener las áreas correspondientes para los usos de suelo de interés.

Se efectuaron censos de perforaciones existentes y construidas para una red de monitoreo de aguas subterráneas. En este trabajo se analizan los relevamientos de campo que se realizaron en octubre de 2006 y noviembre de 2007. El total de pozos censados en cada oportunidad fue de 42, lo cual significa una densidad de tres pozos por km².

Se adjudicó un valor de infiltración para cada tipo de uso del suelo y se evaluó la recarga para cada situación. Se consideró el incremento de la población, analizándose las estadísticas de INDEC (1960, 1980, 1991, 2001, 2010) para la localidad de San Clemente del Tuyú. Con base en estos datos se aproximó un valor para la demanda media anual de agua y considerando 200 l/d como consumo medio (Planas *et al.*, 2000), se estimó el volumen necesario para abastecer a los habitantes permanentes.

Se determinaron los excesos de agua efectuando balances hídricos mensuales de acuerdo con Thornthwaite y Mather (1955), y los valores de ET_0 (evapotranspiración de referencia) media diaria según el método de Penman-Monteith (Allen, Pereira, Raes,

& Smith, 1998). Los datos de precipitación corresponden a las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional Argentino de Santa Teresita (1990–2007) y Dolores (1925–2006), que resultan representativos para el estudio climatológico de la región. También se contó con datos de un pluviómetro instalado en San Clemente del Tuyú, con registro para el periodo 2002–2011.

Para un análisis más detallado, se dividió el área en tres sectores: norte, central y sur, evaluándose en el sector central la influencia de la variación en los usos del suelo sobre la infiltración. Con base en el uso del suelo, se seleccionaron dos áreas características de situaciones extremas (duna natural y duna urbanizada). Se elaboraron mapas isofreáticos y de isovariación de los niveles freáticos. Los resultados obtenidos fueron comparados con la infiltración estimada a partir del balance hídrico, según distintos periodos de tiempo, para las dos áreas planteadas.

La interpolación de datos hidrodinámicos para obtener mapas de curvas de igual valor se realizó mediante la opción *Interpolation* de la herramienta *Spatial Analyst Tool* de *ArcGis v9.2*. Se utilizó la metodología de tipo vecino próximo (*Natural Neighbor*), por tratarse de la que mejor representa el comportamiento de las variables en la región. A partir de esta salida en formato *ráster* se obtuvieron los mapas de curvas isofreáticas, utilizando la opción *Contour* de la herramienta *Surface Analysis de Spatial Analyst Tool*. Posteriormente se han realizado ajustes sobre los mapas de acuerdo con interpretación propia y conocimiento del sistema. A partir de los mapas de flujo, se calcularon los gradientes hídricos y velocidad efectiva, máximos y mínimos, utilizando el coeficiente de permeabilidad (20 m/d) y porosidad efectiva (10%) tomados como referencia por los estudios realizados en la zona por Sala *et al.* (1976).

El mapa de isovariaciones de niveles freáticos fue construido utilizando la función *Raster Calculator*, tomando como capas *ráster* de entrada los mapas previamente obtenidos

para cada año. Este mapa se utilizó para estimar la variación del volumen de agua dulce almacenada por encima de 0 msnm entre 2006 y 2007. Dicha estimación se realizó utilizando el valor medio de las curvas de isovariación, una porosidad efectiva del acuífero del 10% y el área estimada para cada rango de variaciones. Para el cálculo de esta área primero se realizó una reclasificación mediante el uso de la herramienta *Reclassify (3D Analyst Tools)*, donde se fijaron los rangos de variación, y se obtuvieron los valores de área de cada píxel y celda.

Resultados

Evolución de la duna costera

El ambiente de duna costera puede ser subdividido en duna fija y duna activa. La duna activa se localiza adyacente a la playa hacia el oeste, sobre la línea de costa, y conserva su dinámica de transporte debido a los vientos provenientes del este. Si bien se observa la presencia de vegetación, ésta es escasa, tratándose, en general, de especies que se caracterizan por presentar extensos sistemas de raíces y tallos subterráneos, lo que ayuda a consolidar la arena de la duna. En el sector sur, la presencia de vegetación es aún menor (figura 2).

La duna fija se encuentra al oeste de la duna activa, y se observa una mayor presencia de vegetación que ha fijado el sustrato arenoso, impidiendo su movilización. En ocasiones se trata de especies típicas de duna y, en otras, introducidas por el hombre con propósitos recreacionales (plazas, *campings*, etc.) (figura 3). La presencia de la urbanización extendida es otro factor que ha contribuido a la compactación de las arenas de la duna tanto mediante la construcción de viviendas como al trazado de calles.

De la totalidad del área estudiada, donde el ambiente de dunas ocupa 20 km², se observa que la duna fija ha incrementado su área a lo largo del tiempo, abarcando el 72% de la superficie en 1958, alcanzando el 86% en 2005 (figura

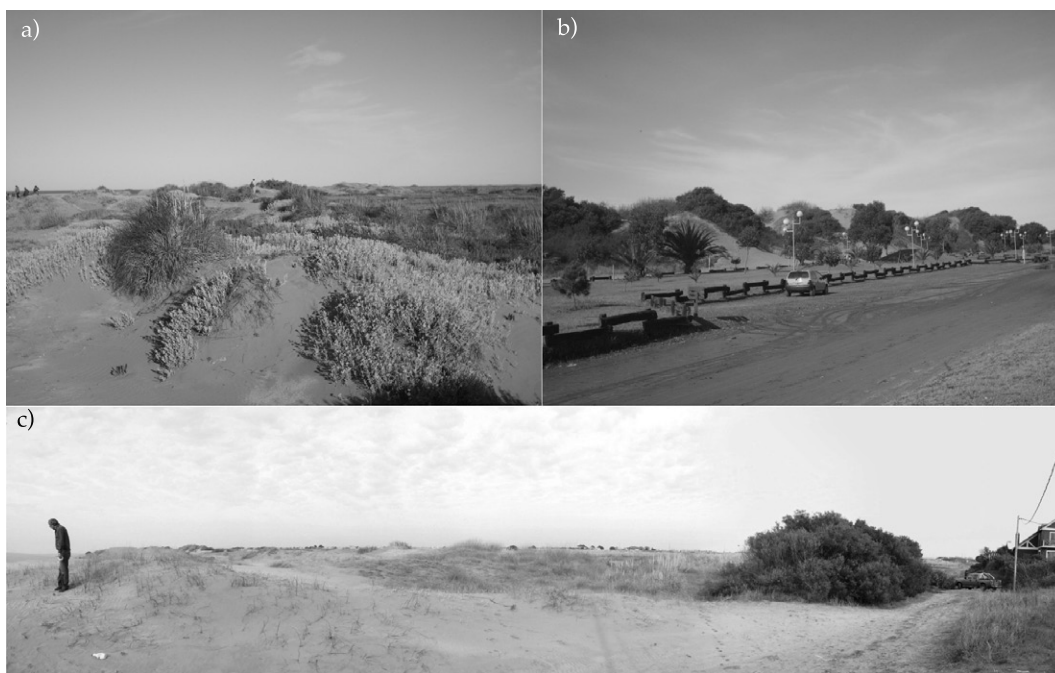


Figura 2. Duna activa, con escasa vegetación; a) sector en Punta Rasa, b) sector norte de la ciudad, c) sector sur.



Figura 3. Distintos ejemplos de áreas de duna fija debido a la vegetación y urbanización.

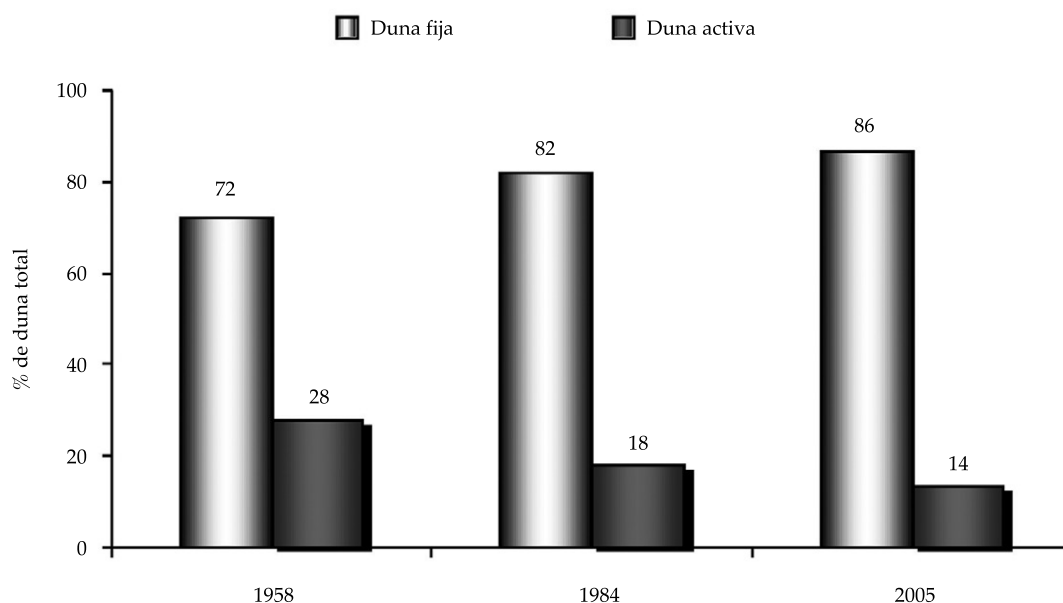


Figura 4. Evolución de la duna fija y activa a través del tiempo.

4). La evolución de la duna fija manifiesta un aumento de su superficie en detrimento de la duna activa, pero la fijación no es meramente un proceso natural, sino que también está afectada por el avance de la urbanización, lo cual impacta en el comportamiento hidrológico natural del sistema.

En la figura 5a se observa la distribución en porcentajes de la duna activa para los diferentes años estudiados.

En 1958, esta distribución era de 22, 23 y 41% de su área, repartida entre el sector norte,

central y sur, respectivamente. Para 1984 se observa una reducción generalizada de la duna activa, ocupando un 15% en el sector norte, un 8% en el central y un 35% en el sur. Por su parte, para 2005, en el norte se ha producido una leve recuperación, pasando del 15 al 18%; pero en los sectores central y sur, la disminución en la superficie de la duna activa está representada por el 7 y el 17%.

En el sector norte, donde el ambiente de duna ocupa 8 km², la mayor disminución en la duna activa se da entre 1958 y 1984 (6%),

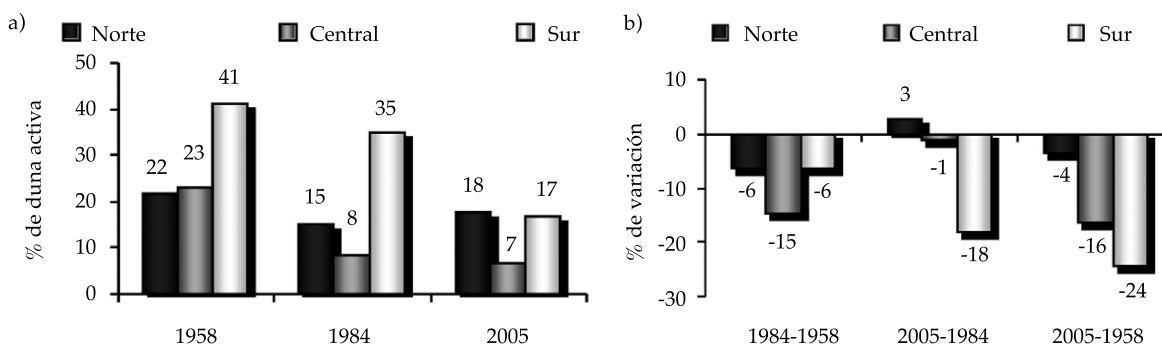


Figura 5. a) Porcentajes de duna activa distribuido por sectores; b) porcentajes de variación de la duna activa.

lo cual se puede observar especialmente en el límite con el sector central, donde comienza la urbanización; luego, entre 1984 y 2005 existe una leve recuperación, con un incremento de su superficie en un 3%. En los 47 años considerados (1958-2005), la duna activa

presenta una reducción total del 4% (figura 5b). A diferencia de los otros sectores, en el norte, el trazado de la ciudad no se ha extendido (figura 6a), ya que estas tierras pertenecen al dominio militar. Además, salvo la zona de dunas, el resto de la superficie se compone de

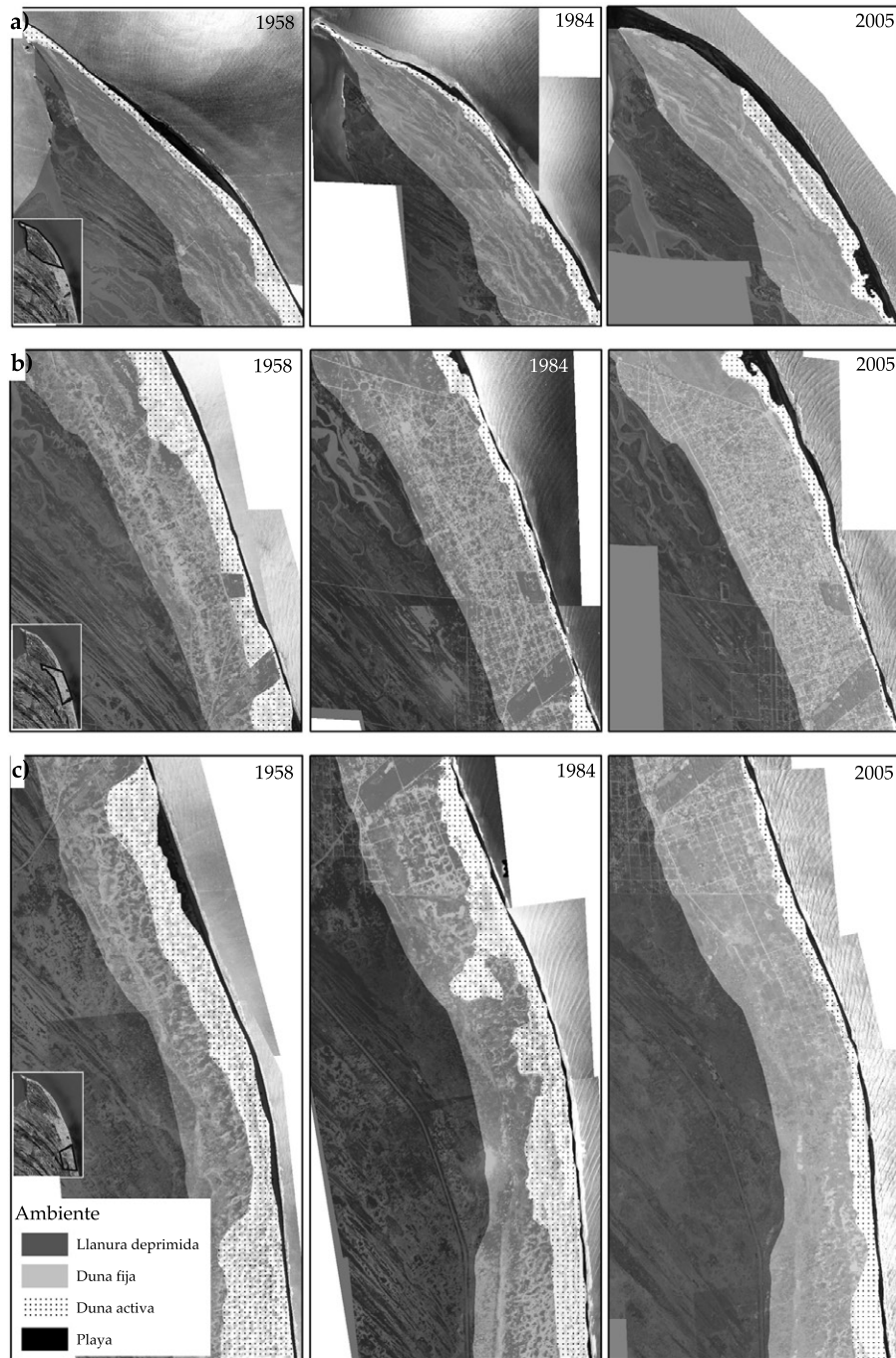


Figura 6. Evolución en la morfología del sector norte (a), central (b) y sur (c) a través del tiempo.

bajos afectados por la influencia mareal y el desarrollo de cangrejales, no resultando apto para edificaciones.

En el sector central, la duna se desarrolla en un área de 6 km². La pérdida total de duna activa entre 1958 y 2005 es del 16% de su superficie, lo cual cuadruplica el valor obtenido para el sector norte. La reducción de la duna activa observada entre 1958 y 1984 es más del doble que en el norte (15%), mientras que la variación entre 1984 y 2005 es de menor magnitud (1%) (figura 5b). En el sector central, en la fotografía de 1958 (figura 6b) resulta difícil reconocer las calles y casas del trazado urbano; mientras que en 1984, la urbanización resulta ser el rasgo más destacado. Incluso la duna fija ha sido modificada de un periodo al otro, ya que en 1958 se observa una superficie no tan compactada como parece ser 26 años más tarde. En 2005, la imagen muestra que la duna activa continúa reduciéndose y la urbanización definitivamente se ha afianzado, dejando muy pocos rasgos pertenecientes al ambiente natural de dunas. Estas modificaciones traen como consecuencia variaciones en el ciclo hidrológico.

El ambiente de duna en el sector sur abarca 6 km²; el total de duna activa perdida en este sector (figura 5b) entre 1958 y 1984 es equivalente a la reducción detectada en el sector norte (6%), pero entre los años 1984 y 2005, el área perdida es aún mayor y se triplica (18%). Entre 1958 y 2005, la disminución es del 24%. En la figura 6c puede observarse que en 1958, e incluso en 1984, casi no se distinguen loteos o construcciones, pero entre 1984 y 2005 se ha producido una fuerte modificación en este paisaje. Hacia el límite con el sector central

se observa un aumento en la densidad de las viviendas, y un tanto más al sur, un trazado de loteos para futuras edificaciones.

Variaciones en la infiltración

Los excesos de agua medios anuales de acuerdo con los balances hídricos estimados desde 1959 a 2011 están en el orden de los 430 mm/año (aproximadamente el 43% de las precipitaciones) (cuadro 1).

Estos excesos de agua de las precipitaciones se constituyen en infiltración que produce la recarga del sistema hídrico subterráneo. Las características naturales del ambiente de duna indican la inexistencia de escurrimiento superficial y condiciones homogéneas de infiltración. Las precipitaciones medias, como fuente de ingreso al sistema hídrico, se han mantenido y se considera que no serían responsables de las variaciones en las reservas de agua subterránea (Carretero & Kruse, 2010).

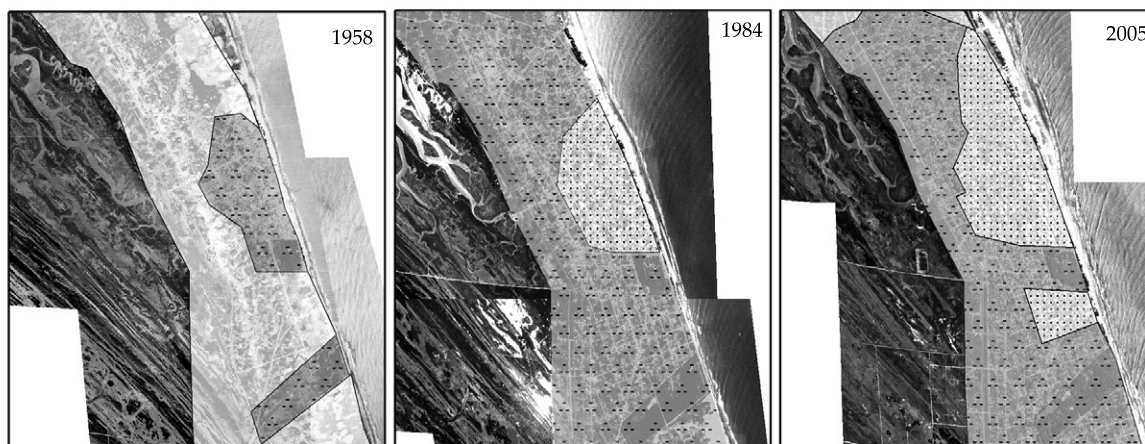
Como se ha observado previamente, el sector central presenta una fuerte modificación debido a los cambios en el uso del suelo, donde el ambiente de duna ha sido afectado por el desarrollo de la urbanización.

Para analizar la relación entre urbanización e infiltración, considerando cambios areales y temporales, en el ambiente de duna del sector central se identificaron tres zonas (figura 7), con distintas respuestas en las posibilidades de infiltración.

La zona 1, con suelo arenoso, escasa urbanización, espacios verdes y calles sin pavimentar. La zona 2 es el ambiente natural de dunas, con suelo arenoso, escasa vegetación e insignificante densidad de población. En la zona 3 se han

Cuadro 1. Resultados de los balances hídricos efectuados para la región (valores en mm).

Localidad	Periodo	Precipitaciones	ETP	ETR	Excesos
Dolores	1959-2006	948	690	520	427
Santa Teresita	1990-2007	995	684	525	268
San Clemente	2002-2011	881	626	468	413
Promedio		941	667	504	436



Zonas

- Zona 1: suelo arenoso, escasa urbanización, espacios verdes y calles sin pavimentar
- Zona 2: ambiente natural de dunas, con suelo arenoso, escasa vegetación e insignificante densidad de población
- Zona 3: densamente urbanizados y calles con pavimento

Figura 7. Evolución de las zonas 1, 2 y 3 para el sector central.

incluido los sectores densamente urbanizados y donde las calles están pavimentadas. Un análisis detallado de las superficies impermeabilizadas en cada una de estas zonas permitió definir que en la zona 1, la infiltración de los excesos de agua se produce en un 60% de su superficie; en la zona 2, en el 100%; mientras que en la zona 3 sólo el 20% de los excesos infiltra en pequeñas superficies, y el resto conforma un escurrimiento superficial que descarga al mar.

En la figura 7 se observa la evolución a través del tiempo de las zonas definidas para el sector central. En 1958, la zona 3 no existía, se reconoce su presencia en 1984, donde abarca 0.84 km² (cuadro 2) y en 2005 incrementa su área, pasando a 1.5 km². La zona 2, con un área

de 4.8 km² en 1958, desapareció a partir de 1984. La zona 1 ha ganado superficie, pasando de 0.95 km² en 1958 a 4.5 km² en 1984; en 2005 reduce su superficie a 4.13 km² debido al crecimiento de la zona 3.

De lo previamente analizado se destaca que el área natural de duna ha desaparecido en el lapso de 26 años (1958-1984), dando lugar al crecimiento urbano en diferentes grados, afectando la superficie expuesta apta para infiltración y la subsiguiente recarga. A partir del área afectada por la infiltración estimada (cuadro 2) y considerando el valor de excesos promedio (430 mm/año), se evaluó para cada año y zona el volumen infiltrado que se considera como la recarga del sistema subterráneo de acuerdo con las condiciones

Cuadro 2. Áreas calculadas para las zonas 1, 2 y 3 en el sector central y su correspondiente superficie apta para infiltración.

	Área (km ²)			% infiltración por zona	Área afectada por infiltración (km ²)		
	1958	1984	2005		1958	1984	2005
Zona 1	0.95	4.53	4.13	60	0.57	2.72	2.48
Zona 2	4.8	0	0	100	4.8	0	0
Zona 3	0	0.84	1.5	20	0	0.17	0.30

descritas.

En 1958, la recarga total era de 2.31 hm³ distribuidos entre las zonas 1 y 2, con 0.25 y 2.06 hm³, respectivamente. Para 1984, la recarga totaliza 1.24 hm³ entre la zona 1 (1.17 hm³) y la zona 3 (0.07 hm³). Finalmente, en 2005, se registra el valor más bajo, siendo 1.19 hm³ la recarga estimada, también distribuidos entre las zonas 1 y 3, con valores de 1.06 y 0.13 hm³ (cuadro 3).

En función de los valores expuestos, entre 1958 y 1984 se produjo una disminución en la recarga del 46% (1.07 hm³), mientras que entre 1984 y 2005 fue de 4% (0.05 hm³). Si se considera el periodo total del estudio, entre 1958 y 2005 se estima una reducción de la recarga del 48% (cuadro 4).

El agua que no infiltra se transforma en escurrimiento superficial en la zona urbanizada, donde por medio de desagües pluviales se descargan los excedentes al mar. La impermeabilización de la superficie reduce tanto la infiltración como la evaporación, dando lugar a la existencia de este escurrimiento superficial que es prácticamente inexistente en el ambiente natural de duna. Por estas razones, en el ambiente urbano (zona 3), eventos de tormenta traen como consecuencia inundaciones en la zona pavimentada, sobre todo en el sector de la costanera y del centro comercial, así como la pér-

didada de un importante volumen de agua hacia el mar, que constituiría una potencial recarga al acuífero (figura 8).

Se han expuesto los efectos de la urbanización sobre la infiltración en el área de estudio, observando que hay una reducción de los ingresos al sistema hidrológico. Mediante el análisis de la evolución de la demanda de agua para la población estable de la localidad, se pretende advertir que el avance de la urbanización, consecuencia del crecimiento poblacional de la región, lleva al incremento en las necesidades de uso del recurso hídrico.

Según los censos nacionales del Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina (INDEC), la población era de 1 750 habitantes en 1958, 6 500 en 1984 y 12 000 para 2005, con casi la totalidad de los habitantes asentados dentro del sector central. Como consecuencia, el consumo de agua ha mostrado un constante aumento, siendo de 0.13, 0.47 y 0.88 hm³ en 1958, 1984 y 2005, respectivamente (cuadro 3), multiplicándose por 4 entre 1958 y 1984, y duplicándose entre 1984 y 2005. Para la totalidad del periodo (1958-2005), el consumo de agua se ha septuplicado (cuadro 4). Debe tenerse en cuenta que el suministro de agua potable se realiza a partir de un campo de bombeo situado hacia el sur, fuera de la zona urbanizada. La explotación se

Cuadro 3. Recarga y consumo estimados para los años 1958, 1984 y 2005.

Recarga (hm ³)	1958	1984	2005
Zona 1	0.25	1.17	1.06
Zona 2	2.06	0	0
Zona 3	0	0.07	0.13
Total	2.31	1.24	1.19
Consumo total habitantes	0.13	0.47	0.88

Cuadro 4. Evolución de la recarga y consumo a través del tiempo.

		1958-1984	1984-2005	1958-2005
Recarga	Disminución (hm ³)	1.07	0.05	1.12
	%	46	4	48
Consumo	Aumento (hm ³)	0.35	0.4	0.75
	Factor	4	2	7



Figura 8. a) Caños pluviales colocados en la Av. Costanera, que descargan hacia la playa y el mar; b) desagüe que termina en la playa, donde posteriormente el flujo se conduce al mar; c) calles inundadas en la costanera de San Clemente del Tuyú.

realiza a través de un sistema de pozos Ranney y un sistema Wellpoint, ubicados en el cordón costero. Se considera que no existen pérdidas significativas de la red de distribución de agua que alimenta a la capa freática debido a que se trata de una red en buen estado, que cuenta con menos de 20 años de funcionamiento. Lo mismo ocurre con el servicio de saneamiento, que tiene menos de 10 años de instalación. Los bajos contenidos de nitratos en el agua freática son indicadores de tal situación (Carretero *et al.*, 2013b) y, a su vez, las redes de flujo subterráneo no muestran modificaciones apreciables que indiquen áreas de recarga como consecuencia de la pérdida de cañerías en el subsuelo.

De lo expuesto se observa que los ingresos al sistema acuífero se han reducido a lo largo del tiempo mientras que los egresos (consumo y pérdidas por escurrimiento superficial) han aumentado.

Variaciones de niveles freáticos

A partir de los datos de la red de monitoreo se confeccionaron mapas de flujo de la capa freática correspondientes a octubre de 2006 y noviembre de 2007 (figura 9).

Para 2006, en el sector sur se reconoce un área elevada en la morfología freática, con curvas isofreáticas que oscilan entre 1.5 y 2.5 msnm. A partir de los datos de 2007, como consecuencia de un año hidrológico con mayores excesos de agua y consecuentemente más infiltración, puede observarse que el sector delimitado por la curva de 1.5 msnm ha aumentado su expresión areal. También se manifiesta un área elevada con la curva de 1.5 msnm en el sector norte que no aparecía en 2006. En ambos casos se reconoce un gradiente hídrico en dos direcciones opuestas: hacia el este al mar y en dirección oeste hacia la llanura deprimida. Para



Figura 9. Mapas isofreáticos, censo 2006 y 2007.

2006, el gradiente hídrico máximo es de 0.0028, con una velocidad efectiva correspondiente a 0.056 m/d en el sector sur. El mínimo es de 0.0008 y 0.016 m/d, respectivamente, en la zona norte. En cambio, en el mapa de flujo de 2007, se obtuvo un gradiente hídrico de 0.0032 y una velocidad efectiva de 0.064 m/d, con máximos en la zona sur. Los mínimos tienen valores de 0.0009 de gradiente hídrico y 0.018 m/d de velocidad efectiva.

Se realizó una evaluación en forma detallada de las variaciones de los niveles freáticos entre 2006 y 2007, en dos áreas tipo seleccionadas, las cuales se corresponden con una duna netamente urbanizada (asignable a la zona 3)

y la otra con una duna natural (asignable a la zona 2).

Se efectuaron balances hídricos para los dos años hidrológicos, abarcando los periodos de octubre 2005 a septiembre 2006, y de octubre 2006 a septiembre 2007, fechas en las que se realizaron las mediciones de niveles freáticos. En 2006, las precipitaciones alcanzaron 811 mm, siendo los excesos de agua de 349 mm; mientras que en 2007, los valores son 1 000 mm y 442 mm, respectivamente. La precipitación media anual histórica (1990-2007) es de 1 000.1 mm, este valor es similar al registrado en 2007, encontrándose 2006 por debajo de la media.

Los resultados del balance hídrico se ven reflejados en el comportamiento de la capa freática. En 2007, año con mayores excesos, se observó un ascenso generalizado de los niveles freáticos en toda el área respecto del año anterior (figura 9), lo cual se traduce en una rápida respuesta en la recarga al acuífero.

A partir de los mapas de flujo obtenidos y considerando como plano de referencia el 0 msnm, se estimó el volumen de agua dulce disponible para 2006 y 2007 para las dos áreas tipo. Se presentan los resultados en el cuadro 5, donde puede observarse que en la zona urbanizada (zona 3), el incremento del volumen de agua dulce es de 0.04 hm³ de un año al otro, mientras que en el área de duna natural (zona 2) es de 0.14 hm³, triplicando el volumen de recarga.

El mapa de isovariación del nivel freático entre los dos periodos (figura 10) muestra un ascenso generalizado del nivel freático. Para la duna urbanizada, las variaciones entre los 0 y 0.3 m están ampliamente distribuidas, luego se ven aumentos dentro del rango 0.3 y 0.6 m en menor proporción (figura 10-1). En cambio, en la duna natural, se observan sectores con ascensos del nivel freático con rangos entre 0-0.3 m, 0.3-0.6 m y 0.6-0.95 m. Esta área presenta sectores con ascensos más pronunciados que la duna urbanizada, además de una distribución areal más amplia del rango 0.3-0.6 m (figura 10-2).

Los resultados muestran que los 442 mm de excesos del balance hídrico para 2007, transformados en recarga al sistema acuífero, se reflejan de manera diferencial según se trate de un área natural de duna o de un sector altamente urbanizado conformado por un elevado porcentaje de superficies impermeables.

Discusión

Si bien se han estudiado casos en donde la recarga puede mantenerse o aumentar a pesar del incremento de las áreas impermeables debido a superficies con permeabilidad secundaria o pérdidas provenientes de las redes de agua y saneamiento (Kruse *et al.*, 2013; Lerner, 2002; Lerner & Barrett, 1996; Hibbs & Sharp, 2012; Sharp, 2010; Sharp *et al.*, 2013; Wiles & Sharp, 2008), en la costa oriental de la provincia de Buenos Aires se ha observado una progresiva disminución de la recarga y, consecuentemente, de las reservas de agua subterránea.

En otras localidades del cordón costero, en donde la zona intensamente urbanizada no está provista de una red de abastecimiento de agua potable, se han registrado casos de intrusión salina que han degradado la calidad química del acuífero por sobreexplotación (Carretero, Kruse, & Rojo, 2013c; Perdomo, Carretero, Kruse, & Ainchil, 2013).

El hecho de que en San Clemente del Tuyú no se haya producido este fenómeno demuestra que en zonas costeras es fundamental contar con servicios de provisión de agua a la población, en especial en el área densamente urbanizada localizada sobre la línea costanera.

Otra cuestión a considerar es la proyección del crecimiento urbano sumado al aumento del nivel del mar, consecuencia del cambio climático global. Se han realizado pronósticos para la región (Partido de La Costa) con base en diferentes modelos (Carretero *et al.*, 2013a), en donde el escenario más desfavorable predice una intrusión de la cuña salina mayor a 200 m para un metro de aumento del nivel del mar. En el mismo trabajo se predijo un incremento de la población estable hasta los 100 000 habitantes (actualmente se registran 70 000),

Cuadro 5. Volumen almacenado e incremento.

Ambiente	Volumen (hm ³)		
	2006	2007	Incremento
Urbanizado	0.13	0.17	0.04
Duna	0.25	0.38	0.14

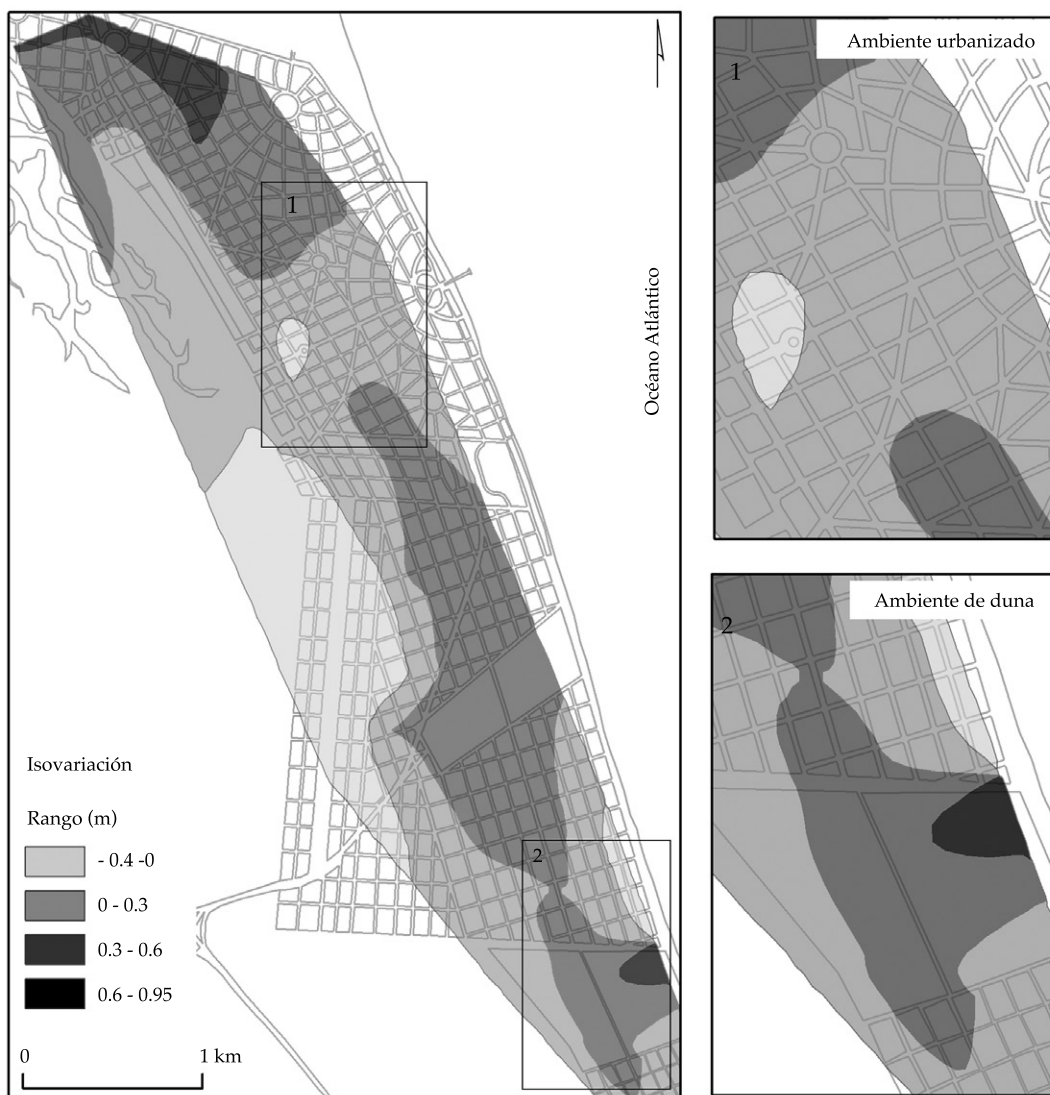


Figura 10. Mapa de isovariación entre los censos 2006 y 2007.

con lo cual el acuífero freático de agua dulce estaría fuertemente afectado con sólo 0.31 m de elevación del nivel del mar. Un crecimiento mayor, asociado con una tasa de consumo de agua superior, afectaría al acuífero con menores valores de incremento en el nivel medio del mar, resultando en una situación de riesgo a menor plazo.

El análisis de la calidad y protección del agua ha sido declarado como uno de los principales propósitos en distintos países, en

especial aquellos pertenecientes a la Unión Europea (EU Water Framework Directive). Si bien en Argentina no existen políticas explícitas referidas a la planificación y gestión de las zonas costeras, existe en cambio una profusa normativa general en los tres niveles (nacional, provincial y municipal), con competencias superpuestas en este ámbito (Barragán-Muñoz, 2005). Es evidente la necesidad de adoptar medidas de planificación y ordenamiento territorial frente al crecimiento de los núcleos

urbanos. Las zonas costeras, con la fuerte influencia de la actividad turística sumada a la alta vulnerabilidad de los acuíferos, deberían ser consideradas de manera especial a la hora de fijar las pautas de manejo del recurso.

Conclusiones

La urbanización y el aumento de la población han generado importantes modificaciones en el ambiente de la duna costera. En la duna activa, la infiltración de los excesos de agua a través de las arenas resulta de una mayor significación. Si esas arenas están más compactadas presentan una mayor cantidad de vegetación o se encuentran cubiertas por superficies impermeables (duna fija), disminuyen las posibilidades de infiltración.

En el análisis de la evolución de la duna costera a través del tiempo se ha advertido un incremento del área correspondiente a la duna fija, en detrimento de la duna activa. La duna fija ocupaba el 72% de la totalidad del ambiente dunar en 1958, pasando al 86% en 2005. En los 47 años considerados (1958-2005), la duna activa presenta una reducción del 4% en el sector norte, del 16% en el central y del 24% en el sur.

Se ha realizado un análisis temporal de la relación entre urbanización e infiltración en el sector central, considerando tres zonas con diferentes respuestas ante la infiltración. Este sector es el que presenta una mayor modificación en la morfología general del paisaje debido al desarrollo de la urbanización, que ha afectado el ciclo hidrológico natural. Se observa que la zona de duna natural (zona 2) ha desaparecido a partir de 1984, mientras que las zonas correspondientes a las áreas con diferentes grados de urbanización (zona 1 y 3) han incrementado su superficie de modo considerable. Asociado con estas variaciones, se advirtió que la recarga ha disminuido conforme ha avanzado el desarrollo de las superficies impermeables, pasando de 2.31 hm³ en 1958 a 1.19 hm³ en 2005. La infiltración

y, por consecuencia, la recarga en este sector sufrió una disminución de 48% en 47 años. La reducción en la recarga no se relaciona con factores climáticos sino con una menor infiltración de las precipitaciones causadas por el aumento de las superficies urbanizadas, dando lugar a un escurrimiento superficial que es descargado hacia el mar mediante desagües pluviales, perdiéndose dicho volumen de agua, que debería formar parte de la recarga subterránea.

Existe una estrecha relación entre la modificación geomorfológica de la duna debida al cambio en el uso del suelo y las posibilidades de infiltración. Los años con mayores excesos se reflejan en un ascenso generalizado de los niveles freáticos, tal como se ha observado en el análisis entre 2006 y 2007. Sin embargo, este comportamiento se manifiesta de manera diferencial según se trate de la zona de duna natural o de la duna urbanizada. En la duna natural se registran los mayores ascensos en el nivel freático, llegando hasta 0.95 m, con una mayor distribución del rango 0.3-0.6 m, lo que significa un mayor incremento en las reservas de agua subterránea. En cambio, en la duna urbanizada, los ascensos son menores, con un máximo dentro del rango 0.3-0.6 m y la mayor distribución entre los 0 y 0.3 m. La variación del volumen de agua dulce, calculado entre 2006 y 2007, da como resultado que en la duna urbanizada existe un aumento de 0.04 hm³ de un año al otro, mientras que la duna natural es de 0.14 hm³, valor que triplica el volumen de recarga, comparado con la duna urbanizada.

Para el manejo del agua proveniente de eventos de tormenta y para compensar las pérdidas en la recarga como consecuencia del aumento del escurrimiento superficial, sería imprescindible la modificación del sistema actual de drenajes hacia el mar, con la implementación de sistemas urbanos de diseño sustentable (SUDS), que podrían incluir métodos como pozos y zanjas de infiltración, depósitos o estanques de detención, y el reemplazo de zonas de estacionamiento por superficies

de pavimento permeable. También podrían implementarse sistemas de recolección de agua de lluvia por techos que serían llevados a sitios de almacenamiento y uso, o directamente dirigidos a lugares preferenciales para aportar a la recarga del acuífero. Cualquiera de estas metodologías deberá ser estudiada de manera detallada, para permitir la recuperación del mayor volumen de agua de lluvia y evitar que la materia en suspensión y contaminantes alcancen el agua subterránea. Existen medidas preventivas que competen a la legislación, educación y programación económica que deberían contemplarse para evitar mayores inconvenientes con el futuro crecimiento de la región.

El análisis presentado es de utilidad para los tomadores de decisiones a la hora de establecer pautas de manejo para el ordenamiento territorial y uso sustentable del recurso hídrico, no sólo en la localidad de San Clemente de Tuyú, sino en toda la costa arenosa de la provincia de Buenos Aires. Los valores de reducción en la recarga para las localidades en donde se cuenta con redes de flujo subterráneo podrían ser extrapolados al resto del Partido de La Costa. Las características naturales y problemáticas descritas afectan a la mayoría de las localidades de la región, sumándose, además, el hecho de que muchas no poseen servicio de abastecimiento de agua a la población y los habitantes se suplen mediante pozos individuales, sin control de la cantidad y/o calidad del agua extraída. La falta de redes de monitoreo en la región hace imposible un análisis detallado y de cuantificación de la reducción en la recarga. El desarrollo de investigaciones por medio de imágenes y fotos aéreas ayudaría a aproximar las superficies impermeables y su evolución, tal como se ha desarrollado en el presente estudio. La metodología planteada puede ser aplicable a cualquier región en donde se cuente con datos climáticos y cartografía suficientes como para desarrollar un estudio areal y temporal, y así generar proyecciones futuras.

Debe tenerse en cuenta que para una gestión sustentable del agua subterránea es necesaria una planificación racional del uso del suelo mediante la preservación de sectores sin urbanización o estableciendo áreas protegidas para facilitar la recarga del acuífero.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (300 pp.). Roma: FAO Irrigation and Drainage Papers 56.
- Almagro, L., & Custodio, E. (2004). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la Formación Chuy, en la franja costera del Este del Uruguay, fronteriza con Brasil. *Boletín Geológico y Minero*, 115, 357-378.
- Barragán-Muñoz, J. M. (2005). *La gestión de áreas litorales en España y Latinoamérica* (198 pp.). Cádiz, España: Universidad de Cádiz.
- Basile, P. A., & Riccardi, G. A. (2000). Procesos hidrológicos urbanos (pp. 253-280). En H. E. Orzoloni, E. D. Zimmermann, & P. A. Basile (Eds.). *Hidrología, procesos y métodos*. Rosario: UNR.
- Batrak, G., & Semenov, S. (2008). *Groundwaters Dynamic Regime in Urban Territories*. 33rd International Geological Congress. Abstract CD HYH-01 General contribution to hydrogeology, Oslo, Norway.
- Bellot, J., Bonet, A., Peña, J., & Sánchez, J. (March, 2007). Human Impacts on Land Cover and Water Balances in a Coastal Mediterranean County. *Environmental Management*, 39(3), 412-422.
- Bocanegra, E., Cardoso Da Silva, G. Jr., Custodio, E., Manzano, M., & Montenegro, S. (2010). State of Knowledge of Coastal Aquifer Management in South America. *Hydrogeology Journal*, 118, 261-267.
- Byrne, G. F., Crapper, P. F., & Mayo, K. K. (1980). Monitoring Land-Cover Change by Principal Component Analysis of Multitemporal Landsat Data. *Remote Sensing of Environment*, 10, 175-184.
- Carretero, S. (2011). *Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires* [en línea]. Tesis doctoral. La Plata, Argentina: Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. Citado el 20 de febrero de 2012] Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/search/request.php?id_document=ARG-UNLP-TPG-0000002075&request=request.
- Carretero, S., & Kruse, E. (2010). Modificaciones en las áreas de recarga del acuífero freático en los médanos costeros de San Clemente del Tuyú, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(4), 466-474.

- Carretero S., Kruse, E., & Forte-Lay, J. A. (2008). Efectos de la urbanización sobre la recarga en médanos costeros (pp. 1-8). *Actas IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Quito, Ecuador.
- Carretero, S., Rapaglia, J., Bokuniewicz, H., & Kruse, E. (2013a) Impact of Sea Level Rise on Saltwater Intrusion Length into the Coastal Aquifer, Partido de La Costa, Argentina. *Continental Shelf Research*, 61-62, 62-70.
- Carretero, S., Dapeña, C., & Kruse, E. (2013b). Hydrogeochemical and Isotopic Characterization of Groundwater in a Sand-Dune Phreatic Aquifer on the Northeastern Coast of the Province of Buenos Aires. *Isotopes in Environmental & Health Studies*, 49(3), 399-419.
- Carretero, S., Kruse, E., & Rojo, A. (2013c). Condiciones hidrogeológicas en Las Toninas y Santa Teresita, Partido de La Costa. En N. González, E. Kruse, M. M. Trovatto, & P. Laurencena (Eds.). *Temas actuales en hidrología subterránea* (pp. 36-43). La Plata, Argentina: EDULP.
- Custodio, E. (2010). Coastal Aquifers of Europe: An Overview. *Hydrogeology Journal*, 18, 269-280.
- Fitzgeralds, D. M., & Buynevich, I. V. (2006). Coastal Barriers [en línea]. En O. Iribarne, & F. Isla (Eds.). *Coastal Zone and Estuaries. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Oxford, UK: Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers. Citado el 21 de mayo de 2014. Recuperado de <http://www.eolss.net/outlinecomponents/Coastal-Zones-Estuaries.aspx>.
- González, N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. En R. de Barrio, E. Etcheverry, M. Caballé, & E. Llambías (Eds.). *Geología y recursos minerales de la provincia de Buenos Aires* (pp. 359-374). *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*, Asociación Geológica Argentina, La Plata, Argentina.
- Hibbs, B. J., & Sharp, J. M. Jr. (2012). Hydrogeological Impacts of Urbanization. *Environmental & Engineering Geoscience*, 18, 3-24.
- Houlahan, J., & Findlay, C. (2004). Estimating the 'Critical' Distance at Which Adjacent Land-Use Degrades Wetland Water and Sediment Quality. *Landscape Ecology*, 19, 677-690.
- Huang, J., Gilmore-Pontius, R. Jr., Li, Q., & Zhang, Y. (2012). Use of Intensity Analysis to Link Patterns with Processes of Land Change from 1986 to 2007 in a Coastal Watershed of Southeast China. *Applied Geography*, 34, 371-384.
- INDEC (1960, 1970, 1980, 1991, 2001, 2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas* [en línea]. Buenos Aires: INDEC. Citado el 15 de febrero de 2012. Recuperado de <http://www.indec.gov.ar>.
- Kim, Y. (2004). Analysis of Hydrochemical Processes Controlling the Urban Groundwater System in Seoul Area, Korea. *Geosciences Journal*, 8(3), 313-318.
- Kim, Y., Lee, K., Koh, D., Lee, D., Lee, S., Park, W., Koh, G., & Woo, N. (2003). Hydrogeochemical and Isotopic Evidence of Groundwater Salinization in a Coastal Aquifer: A Case Study in Jeju Volcanic Island, Korea. *Journal of Hydrogeology*, 270, 282-294.
- Kruse, E., Varela, L., Laurencena, P., Deluchi, M., Rojo, A., & Carol, E. (2004). Modificaciones del ciclo hidrológico en un área del noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (342 pp.). En Junta Directiva AIH-GD (Ed.). *Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas 11*. Madrid: Instituto Geológico Minero de España.
- Kruse, E., Carretero, S., Pousa, J., & Guaraglia, D. (2012). Critical Problems for the Fresh Water Supply to Summer Resorts on the Eastern Coast of the Buenos Aires Province, Argentina (pp. 105-120). In A. E. Rossi & L. S. Miranda (Eds.). *Argentina: Environmental, Geographical and Cultural Issues*. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers.
- Kruse, E., Carol, E., Mancuso, M., Laurencena, P., Deluchi, M., & Rojo, A. (2013). Recharge Assessment in an Urban Area: A Case Study of La Plata, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 21, 1091-1100.
- Kuleli, T., Guneruglu, A., Karsli, F., & Dihkan, M. (2011). Automatic Detection of Shoreline Change on Coastal Ramsar Wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38, 1141-1149.
- Lerner, D. N., & Barrett, M. H. (1996). Urban Groundwater Issues in the UK. *Hydrogeology Journal*, 4, 80-89.
- Lerner, D. N. (2002). Identifying and Quantifying Urban Recharge: A Review. *Hydrogeology Journal*, 10, 143-152.
- LeyVega De Seoane, C., Gallego-Fernández, J. B., & Vidal-Pascual, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras* (244 pp.). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Costas.
- Manzano, M. (2002). El papel de los acuíferos costeros en la gestión del medio natural (pp. 2017-2024). En E. Bocanegra, D. Martínez, & H. Massone (Eds.). *Groundwater and Human Development*. Mar del Plata: ALSHUD.
- Martínez, M. L., & Vázquez, G. (2006). Coastal Sand Dune and Barrier Island [en línea]. In O. Iribarne, & F. Isla (Eds.). *Coastal Zone and Estuaries. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Oxford, UK: Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers. Citado el 21 de mayo de 2014. Recuperado de <http://www.eolss.net/outlinecomponents/Coastal-Zones-Estuaries.aspx>.
- Martínez, M. L., Psuty, N. P., & Lubke, R. A. (2008). A Perspective on Coastal Dunes (pp. 3-10). In M. L. Martínez & N. P. Psuty (Eds.). *Coastal Dunes, Ecology and Conservation, Ecological Studies Volume 171*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Park, S. S., Kim, S. O., Yun, S. T., Chae, G. T., Yu, S. Y., Kim, S., & Young, K. (2005). Effects of Land Use on the Spatial Distribution of Trace Metals and Volatile Organic Compounds in Urban Groundwater, Seoul, Korea. *Environmental Geology*, 48, 1116-1131.
- Perdomo, S., Carretero, S., Kruse, E., & Ainchil, J. (2013). Identificación de la intrusión salina en Santa Teresita

- (Buenos Aires), mediante la aplicación de métodos eléctricos (pp. 44-49). En N. González, E. Kruse, M. M. Trovatto, & P. Laurencena (Eds.). *Temas actuales en hidrología subterránea*. La Plata, Argentina: EDULP.
- Planas, A. C., Gaviño-Novillo, M., Mendiburo, N., Calcagno, A., & Urbano-Jáuregui, L. (2000). *Informe sobre la gestión del agua en la República Argentina* (146 pp.). Buenos Aires: JVP Consultores.
- Pousa, J., Tosi, L., Kruse, E., Guaraglia, D., Bonardi, M., Rizzetto, F., & Schnack, E. (2007). Coastal Processes and Environmental Hazards: The Buenos Aires (Argentina) and Venetian (Italy) Littorals. *Environmental Geology*, 51, 1307-1316.
- Ray, D. K., Pijanowski, B. C., Kendall, A. D., & Hyndman, D. W. (2012). Coupling Land Use and Groundwater Models to Map Land Use Legacies: Assessment of Model Uncertainties Relevant to Land Use Planning. *Applied Geography*, 34, 356-370.
- Rebouças, A. C. (1999). Groundwater Resources in South America. *Episodes*, 22(3), 232-237.
- Sala, J., González, N., Hernández, M., Martín De Uliana, E., Cheli, E., & Kruse, E. (1976). *Factibilidad de provisión de agua subterránea a la localidad de San Clemente de Tuyú-El Tala*. Provincia de Buenos Aires (42 pp.). Informe técnico. La Plata, Argentina: Convenio Cátedra de Hidrogeología, Facultad de Ciencias Naturales, Cooperativa de Obras Sanitarias de San Clemente del Tuyú.
- Seiler, K. P., & Gat, J. R. (2007). Man's Impact on the Groundwater Recharge (pp. 187-200). In *Groundwater Recharge from Run-Off, Infiltration and Percolation*. Netherlands: Springer.
- Shalaby, A., & Tateishi, R. (2007). Remote Sensing and GIS for Mapping and Monitoring Land Cover and Land-Use Changes in the Northwestern Coastal Zone of Egypt. *Applied Geography*, 27, 28-41.
- Sharp, J. M. Jr. (2010). The Impacts of Urbanization on Groundwater Systems and Recharge. *AQUAmundi*, 1, 51-56.
- Sharp, J. M., Krothe, J. N., Mather, J. D., Garcia-Fresca, B., & Stewart, C. A. (2013). Effects of Urbanization on Groundwater Systems (pp. 257-268). In G. Heiken, R. Fakundiny, & J. Sutter (Eds.). *Earth Science in the City: A Reader*. Washington, DC: American Geophysical Union.
- Spalletti, L. A., & Mazzoni, M. M. (1979). Caracteres granulométricos de arenas de playa frontal, playa distal y médano litoral atlántico bonaerense. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 34(1), 12-30.
- Wang, X. (2001). Integrating Water-Quality Management and Land-Use Planning in a Watershed Context. *Journal of Environmental Management*, 61, 25-36.
- Wiles, T. J., & Sharp, J. M. Jr. (2008). The Secondary Permeability of Impervious Cover. *Environmental & Engineering Geoscience*, 14, 251-265.
- Thornthwaite, C., & Mather, J. (1955). The water balance. *Climatology*, 8, 1-37.
- Zuquette, L., Pejon, O., & Dos Santos Collares J. (2004). Land Degradation Assessment Based on Environmental Geoindicators in the Fortaleza Metropolitan Region, State of Ceará, Brazil. *Environmental Geology*, 45, 408-425.

Dirección institucional de los autores

Dra. Silvina Carretero

Facultad de Ciencias Naturales y Museo
 Universidad Nacional de La Plata (UNLP)
 64 núm. 3, 1900 La Plata, Argentina
 Teléfono: +54 (221) 4249 049
 scarretero@fcnym.unlp.edu.ar

Dr. Eduardo Kruse

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 (Conicet)

Facultad de Ciencias Naturales y Museo
 Universidad Nacional de La Plata (UNLP)
 64 núm. 3, 1900 La Plata, Argentina
 Teléfono: +54 (221) 4249 049
 kruse@fcnym.unlp.edu.ar