

Disminución de la Disponibilidad de Agua Potable por Expansión de la Forestación, en el Sector Costero Oriental de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Leonardo Sánchez-Caro^{✉1,2}[0000-0003-2026-1999], Silvina C. Carretero^{1,2}[0000-0002-5023-7124],
Fernanda J. Gaspari^{2,3}[0000-0002-0676-9107] y Alfonso M. Rodríguez Vagaría^{2,3}

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

² Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina

³ Cátedra de Manejo de Cuenas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Argentina

leonardo.sanchezcaro@gmail.com

Resumen. El agua es un recurso natural indispensable para la actividad humana. En acuíferos costeros de espesor y extensión limitados, las variaciones en el uso del suelo pueden condicionar la calidad y cantidad de agua disponible para la explotación, ya sea para uso industrial o para abastecimiento de la población. El objetivo de este trabajo es cuantificar la expansión de las áreas forestadas y el efecto de esta expansión sobre la disponibilidad de agua subterránea, en la localidad de Mar de las Pampas, Partido de Villa Gesell, Provincia de Buenos Aires. A partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas, mediante el mapeo manual detallado de los tipos de cobertura en la zona de estudio, se realizó un análisis del uso del suelo para los años 1975 y 2014. Se calcularon balances hídricos a partir de datos de precipitación, teniendo en cuenta las propiedades hidrológicas características del terreno, para asignar un valor de recarga a cada tipo de cobertura. Los resultados indican una reducción de la recarga de un 26% durante el período 1975-2014, lo cual deberá tenerse en cuenta para la planificación del uso sustentable del recurso hídrico subterráneo, en una localidad actualmente en crecimiento.

Palabras Clave: Agua Subterránea; Calidad Ambiental; Manejo de Recursos Hídricos.

1 Introducción

Las zonas costeras revisten gran importancia desde un punto de vista económico y ambiental, debido a que las poblaciones humanas suelen ubicarse cerca o dentro del ambiente costero. Las poblaciones costeras ejercen modificaciones sobre las condiciones naturales del ambiente, lo cual tiene un gran impacto en el equilibrio costero [1]. Uno

de los recursos más afectados por estas modificaciones es el agua subterránea, especialmente cuando se trata de ambientes de dunas costeras que albergan lentes de agua dulce [2].

La evolución a través del tiempo del uso del suelo en una zona determinada, tiene un gran impacto en varios aspectos aplicados y en las actividades humanas que se desarrollan en dicha zona. Las imágenes satelitales han sido aplicadas con éxito al estudio espacial de distintos tipos de áreas, incluyendo zonas costeras, urbanas, forestadas y agrícolas. Entre otros, fueron llevados a cabo estudios de uso del suelo y cambios en el paisaje [3, 4]. Es frecuente el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en forma conjunta con las técnicas de sensores remotos, para cuantificar la variación temporal uso del suelo [5, 6].

Existen numerosas aplicaciones de los sensores remotos a los estudios hidrológicos e hidrogeológicos; entre ellas, se cuentan el análisis de la variación areal en el tiempo de cuerpos de agua superficiales [7, 8], la identificación de áreas de recarga y descarga naturales [9, 10] y de áreas adecuadas para la recarga artificial en regiones áridas [11].

Las características del suelo afectan directamente al ciclo hidrológico de una zona, dado que la cobertura del suelo controla los procesos de evapotranspiración, infiltración y escurrimiento superficial que atraviesa el agua proveniente de las precipitaciones. Debido a esto, algunos trabajos se centran en la cuantificación de variaciones temporales en la cobertura impermeable, producto de la urbanización [12, 13]. Otros trabajos se centran en las modificaciones en la cobertura forestal de una zona y su impacto hidrológico. La forestación es una actividad antrópica frecuente en ambientes de dunas costeras debido a que la implantación de bosques provee protección contra la erosión y facilita la fijación de las dunas [14]. Sin embargo, se reconocen efectos adversos de la forestación sobre el ciclo hidrológico, específicamente sobre los balances hídricos. La implantación de bosques aumenta la evapotranspiración y disminuye los excesos de agua, por lo cual se ve disminuida la recarga al sistema subterráneo [15-17].

Existen antecedentes de este tipo de estudios en la costa de la Provincia de Buenos Aires. Carretero y Kruse [18] realizaron un análisis de detalle del uso del suelo en San Clemente, entre los años 1958 y 2005. Se estimó una disminución en la recarga de 47% en la zona urbanizada. El mismo análisis fue llevado a cabo en Las Toninas y Santa Teresita entre 1987 y 2012; los resultados mostraron un 30% de reducción en la recarga [19]. Posteriormente, Carretero et al. [20] analizaron la variación en la recarga debida al cambio en el uso del suelo en el Partido de La Costa (que incluye a las localidades mencionadas anteriormente) para el período 1973-2010. En este caso, los resultados indicaron un 10% de reducción en la recarga para la totalidad del área estudiada, aunque la reducción es de un 18 y 30% cuando se focaliza en los centros urbanos. Más recientemente, Rodrigues Capitulo et al. [21] aplicaron una clasificación supervisada a imágenes satelitales Landsat 7 TM del año 2015, para identificar superficies forestadas y suelo desnudo en el Partido de Pinamar. Según los resultados, la recarga sería un 33% menor en las áreas forestadas, respecto de las no forestadas.

En el presente trabajo se analiza la evolución del uso del suelo en un sector de la costa bonaerense (Argentina), vinculando los aspectos geomorfológicos y forestales, como base para la estimación de las modificaciones en la recarga del agua subterránea. A pesar de la importancia del recurso hídrico en la planificación y gestión urbana, aún

no hay estudios de este tipo sobre la zona, de forma que este trabajo resulta de utilidad para iniciar la tarea de cuantificar las reservas de agua dulce en el acuífero freático.

1.1 Área de Estudio

La localidad de Mar de las Pampas se encuentra emplazada en la región geomorfológica conocida como Cordón Costero, en la costa atlántica de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 1). Se centra en los $37^{\circ}19'26''$ de latitud sur y $57^{\circ}01'30''$ de longitud oeste. Forma parte de Partido de Villa Gesell y limita al noreste con la localidad homónima. Hacia el sur, limita con la localidad de Mar Azul; hacia el noroeste, fuera de los límites del cordón costero, dentro de la llanura continental, se encuentra el partido de General Madariaga.

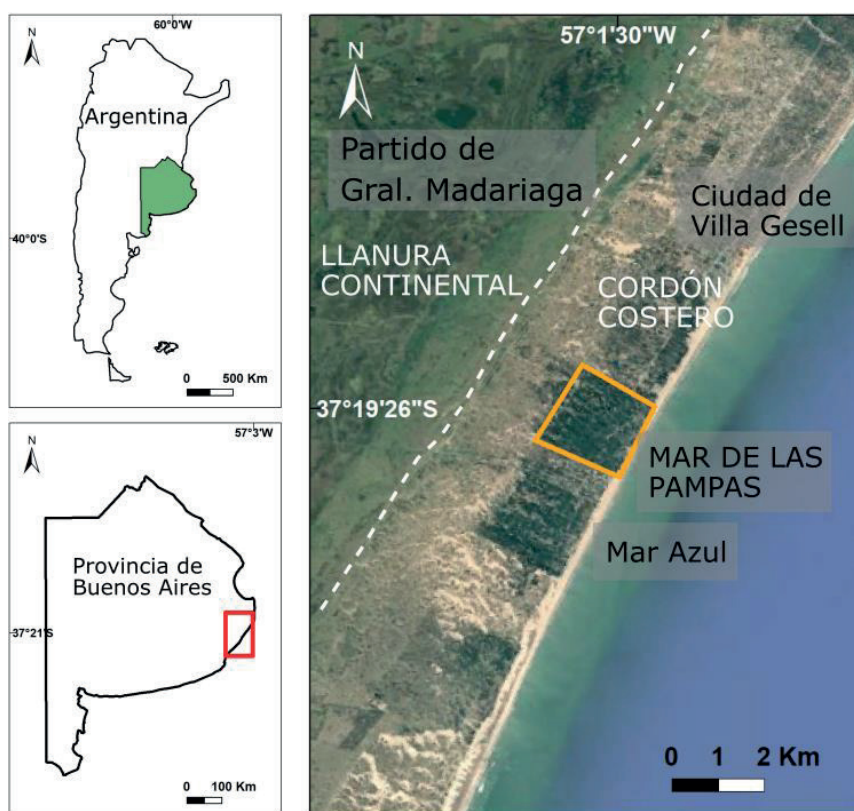


Fig. 1. ubicación del área de estudio.

Los trabajos de fijación de dunas en Mar de las Pampas comenzaron en 1957, pero recién en 1971 se aprobó el plan definitivo de forestación y trazado urbano, en el cual las calles y manzanas debían adecuarse a la morfología medanosa natural. En el año 2010, la población estable era de 1.797 habitantes [22]. Sin embargo, al tratarse de una

localidad balnearia, debe tenerse en cuenta el aumento estacional de la población debido a la avenida turística en la época estival.

El acuífero freático se aloja en el cordón arenoso, que fue construido durante el Holoceno como resultado de la acción conjunta de procesos costeros y procesos eólicos vinculados a la generación y migración de dunas costeras [23, 24]. El cordón costero presenta en esta región poco más de 3 km de ancho; y en el sector central las dunas se elevan hasta aproximadamente 20 msnm [25, 26]. El área de estudio se encuentra dentro de la Región II definida por el Consejo Federal de Inversiones [27]. Esta región presenta características geomorfológicas particulares, que tienen un fuerte impacto en su comportamiento geohidrológico. Rodríguez Capitulo [28] definió un modelo hidrodinámico para la localidad de Pinamar, que forma parte de la Región II y se ubica a pocos kilómetros de Mar de las Pampas. Según este modelo, la recarga de agua subterránea es de índole local y directa a partir de las precipitaciones. Dada la alta permeabilidad del sustrato arenoso, se considera nulo el escurrimiento superficial, de forma tal que los excesos de agua contribuyen en su totalidad a la infiltración. Una vez alcanzada la zona saturada, el agua se mueve desde la zona central del cordón hacia ambos bordes del mismo. Del lado oeste, una zona de interface separa el agua dulce del cordón costero del agua salobre contenida en los sedimentos de la llanura continental. Del lado este, se registra una interface entre el agua dulce y el agua salada del mar. Esta última fue identificada en el Partido de Villa Gesell por Hurtado et al. [29], mediante la realización de estudios geoelectrónicos.

El acuífero costero constituye la única fuente de agua potable para la población. El aumento de la población estable y, especialmente, el desarrollo turístico de la zona, resultan en una creciente presión de explotación sobre el recurso hídrico. A su vez, debe tenerse en cuenta que el sistema costero presenta particularidades que lo hacen especialmente vulnerable respecto de los problemas con el agua, como son la posibilidad de intrusión salina y la sensibilidad a la contaminación por sobrebombeo.

2 Materiales y Métodos

La metodología de trabajo comprendió tareas de mapeo y manejo de datos en SIG (i.e., identificación de distintas unidades de mapeo, digitalización manual de las mismas, análisis multitemporal de su evolución para el período 1975-2014), así como otras propias de los estudios hidrológicos (realización de balances hídricos, asignación de un valor de recarga a los distintos tipos de cobertura del suelo en base a criterios hidrológicos, estimación de la recarga total en la zona de estudio para los diferentes escenarios analizados).

La base para el mapeo del uso del suelo fueron imágenes aéreas y satelitales. Se contó con fotos aéreas del año 1975 facilitadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las imágenes satelitales del año 2014 fueron obtenidas de Google Earth. Se generaron mosaicos con los conjuntos de imágenes correspondientes a cada año, para poder visualizar en su totalidad el área de interés. Las imágenes así compuestas fueron introducidas en un SIG, donde se realizó su georreferenciación según el sistema de coordenadas POSGAR 2007 Transverse Mercator, Datum POSGAR 2007, Faja 6. El

área de mapeo coincide con los límites políticos de la localidad de Mar de las Pampas (Fig. 1). Hacia el sudoeste, noreste y noroeste, se tomaron como límite de mapeo las calles principales que actualmente bordean la localidad. En dirección sudeste, hacia al mar, el mapeo se realizó hasta el comienzo de la zona de playa.

2.1 Geomorfología

Las unidades geomorfológicas fueron definidas en la imagen del año 1975, sobre la base de la textura y tono (en escala de grises) observados en la imagen. Se identificaron dos unidades: (1) dunas costeras, caracterizadas por un tono claro correspondiente a la alta reflectancia de la arena seca, y (2) interdunas, caracterizadas por un tono más oscuro vinculado a la presencia de humedad superficial, y por una textura granular debida a la vegetación herbácea natural que se desarrolla en esas condiciones. Si bien las copas de los árboles pueden impedir puntualmente la observación directa de la superficie, entre las mismas puede identificarse una cobertura correspondiente a la clase (1) descrita, por lo que las áreas cubiertas por árboles fueron asignadas a la categoría de dunas costeras. La Fig. 2 muestra un ejemplo de las superficies de dunas costeras e interdunas.

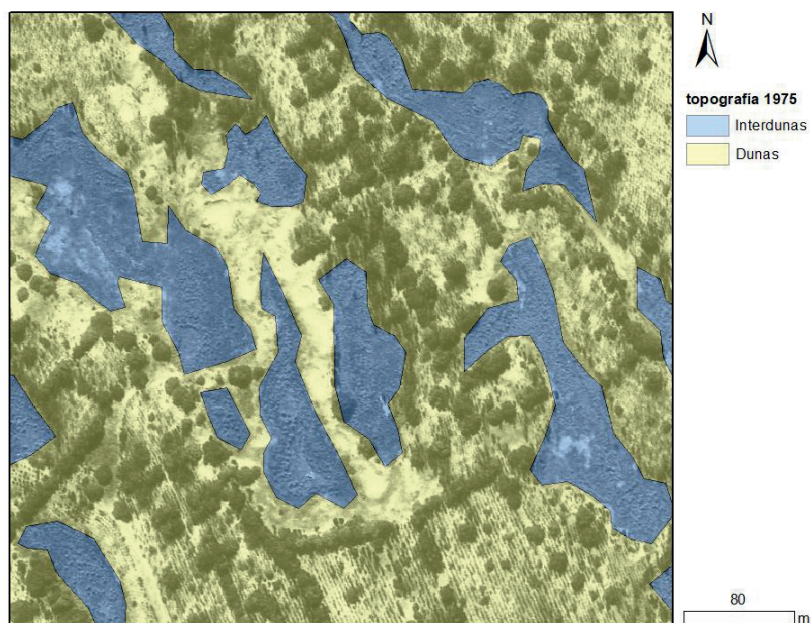


Fig. 2. dunas costeras e interdunas en el área de estudio.

2.2 Uso del Suelo

Se realizó la digitalización manual de las zonas de uso del suelo en los diferentes años a una escala de 1:2.000. El resultado fue la generación de archivos de tipo vectorial con polígonos que representan las diferentes zonas mapeadas. Los usos del suelo fueron definidos sobre la imagen de 1975, para luego extrapolar el criterio de mapeo a la imagen moderna. Dicho criterio consistió en la identificación visual de propiedades que permitieran asignar a la superficie una de las cinco categorías de uso del suelo consideradas, a saber: (1) nulo: no se observa acción antrópica. Incluye zonas de interdunas con tono oscuro por la presencia de arena húmeda y/o vegetación herbácea, así como zonas de alto albedo correspondientes al suelo arenoso desnudo, sin vegetación natural o artificial. (2) plantación inicial: zonas de dunas donde se observa la grilla de plantación de árboles, pero éstos aún no se han desarrollado. (3) ralo forestal: coexisten árboles de escaso desarrollo, apenas visibles en la fotografía aérea, con algunos árboles de mayor tamaño cuyas copas no se tocan entre sí. El suelo arenoso es visible en forma prácticamente continua. (4) medio forestal: similar a ralo forestal, pero con una mayor cobertura por parte de los árboles. Las copas frecuentemente se tocan entre sí, conformando líneas de forestación entrecruzadas; sin embargo, el suelo arenoso es aún visible. (5) denso forestal: las copas forman una cubierta coalescente prácticamente continua, con frecuentes pero pequeños espacios de raleo o cambios en la textura que indican diferentes etapas de desarrollo de los árboles y/o distintas especies.

El área total ocupada por cada categoría en los sucesivos años se obtuvo mediante la función Calculate Geometry presente en el SIG, que proporciona la extensión superficial de los elementos poligonales de formato vectorial incluidos en una capa.

2.3 Comparación Entre Desarrollo Forestal y Relieve

Resulta de interés conocer la evolución en la relación que guardan las variables relieve y uso del suelo a lo largo de la serie analizada. Originalmente, la forestación fue planificada en base a la geomorfología de la zona, con la intención de forestar únicamente las zonas altas (dunas costeras) y ubicar las calles y caminos en las zonas bajas (interdunas). Para determinar la distribución de clases de uso del suelo en las interdunas, así como en las dunas costeras, se realizó una intersección de las capas de uso del suelo y relieve, para cada año analizado.

2.4 Realización de Balances Hídricos

La importancia de cuantificar los excesos en el balance hídrico radica en que la totalidad de dichos excesos constituye la única recarga del acuífero freático, dado que, en el cordón medanoso, el escurrimiento superficial tiende a cero [21].

Para determinar los excesos de agua se realizaron balances hídricos según Thornthwaite y Mather [30], a partir de datos diarios de precipitación del Servicio Meteorológico Nacional en Villa Gesell. La serie de datos corresponde al período 1997-2016; dado que las precipitaciones no han cambiado significativamente en este período, estos

datos se consideran representativos de la lluvia en la región [21]. Se asumió que la interceptación contribuye en un 100% a la evapotranspiración (ET).

Se usaron valores medios diarios de evapotranspiración de referencia (ET_o), estimados con la ecuación FAO Penman–Monteith [31]. La evapotranspiración potencial (ET_c) puede calcularse mediante la ecuación (1):

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (1)$$

donde ET_c es la máxima evapotranspiración de la cobertura; ET_o es la evapotranspiración de referencia y K_c es el coeficiente de cultivo o de cobertura.

La capacidad de campo (CC) media para este suelo dominado por arena fue de 160 mm/m, siguiendo a Falasca y Forte Lay [32], que definen un valor de 140 y 180 mm hasta una profundidad de 1 m a lo largo de la costa arenosa bonaerense. Se consideraron dos casos: suelo desnudo (suelo arenoso con escasa vegetación o sin ella) y forestal (suelo cubierto por un bosque de coníferas). En el primer caso, la profundidad efectiva asignada para el balance fue de 0,25 m y por lo tanto quedó definida una CC de 40 mm, dado que el efecto de la evapotranspiración no puede penetrar más profundo. En el segundo caso debió tenerse en cuenta una exploración de raíces de más de 1 m, ya que se trata de un bosque bien establecido. Por ello, se asignó una profundidad de 1,25 m, que derivó en una CC de 200 mm en el balance.

Se determinaron valores de K_c de acuerdo a FAO [31]. Para la zona de suelo desnudo el valor fue variable a lo largo del año; mientras que para la zona forestal se tomó K_c=1 constante todo el año.

Los valores de ET_o y K_c adoptados fueron procesados con el software AGROAGUA v.5.0 [33]. Esta aplicación permite obtener balances hídricos mensuales a partir de variables como la capacidad de campo, evapotranspiración potencial diaria y precipitaciones diarias. Los balances mensuales así obtenidos fueron agrupados en valores anuales, para luego calcular un valor anual promedio de precipitación y de excesos para las categorías de recarga consideradas.

2.5 Agrupación de Usos del Suelo Según Criterio Hidrológico y Obtención de Valores de Recarga

Las características superficiales del terreno condicionan las posibilidades de infiltración del agua aportada por las precipitaciones. Es posible obtener un valor de recarga total para la zona de estudio, aplicando los balances hídricos explicados previamente a las clases de desarrollo forestal identificadas en el mapeo, y conociendo la distribución espacial de éstas.

Para esto, se agruparon las categorías de uso del suelo según un criterio hidrológico, de forma tal que las categorías nulo, plantación inicial y ralo forestal corresponden a la categoría de recarga de suelo desnudo, mientras que medio forestal y denso forestal se agrupan bajo la categoría hidrológica forestal. La Fig. 3 muestra la correspondencia entre las zonas de uso del suelo y las superficies de recarga para el año 1975.

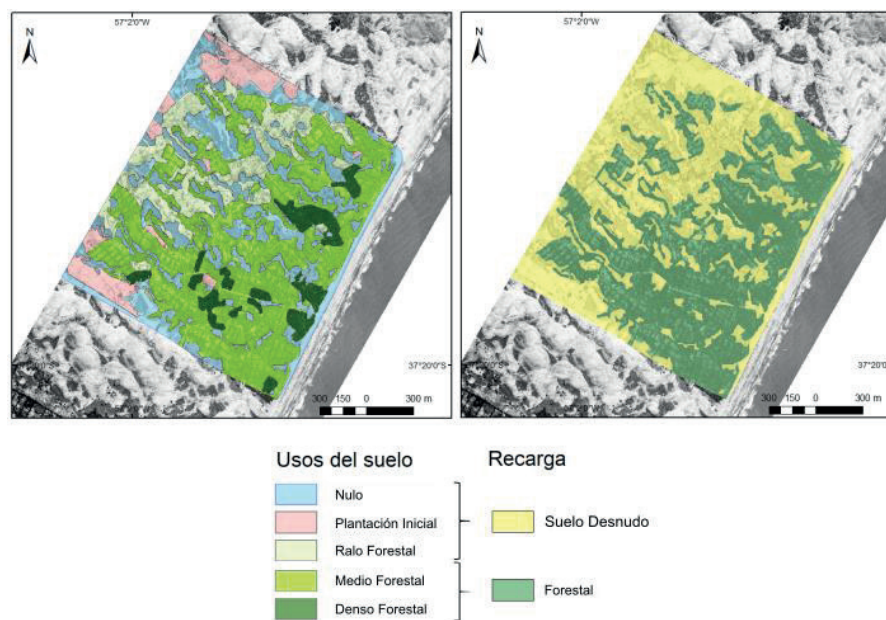


Fig. 3. Categorías de uso del suelo, y sus equivalentes según un criterio de recarga.

Finalmente, se calculó el volumen de agua que habría ingresado como recarga al sistema en las zonas de suelo desnudo y forestal, mediante la multiplicación de su extensión superficial en cada año por el promedio anual de excesos definido para cada zona. El valor total de recarga para cada año surge de la suma de los volúmenes de recarga correspondientes a cada zona. Esto permitió evaluar la variación en la recarga para el período considerado.

3 Resultados

3.1 Evolución del Uso del Suelo

La distribución de zonas de relieve definida en la fotografía de 1975 muestra que, de los 2,77 km² comprendidos en el área de mapeo, 81,7% corresponde a dunas costeras, y 18,3% a interdunas.

Se observan diferencias en la superficie ocupada por cada clase de uso del suelo en los dos momentos considerados (Fig. 4 y Fig. 5a). La Tabla 1 expresa dichas superficies en metros cuadrados.

El año 1975 representa una etapa inicial del proceso de forestación y amanzanamiento. Es por ello que una parte importante de la superficie corresponde al uso nulo (23,6%) y se observa la presencia de la categoría plantación inicial, con un 7,4% del total de la superficie mapeada. La categoría mejor representada es medio forestal, con un 45,8%, mientras que denso forestal se ubica en último lugar con un 6,8%.

En el año 2014 la superficie mapeada se encuentra ampliamente dominada por la categoría denso forestal (con un 83,0% de cobertura), mientras que medio y ralo forestal ocupan un lugar accesorio en la distribución territorial. Las zonas de uso nulo y plantación inicial han desaparecido por completo.

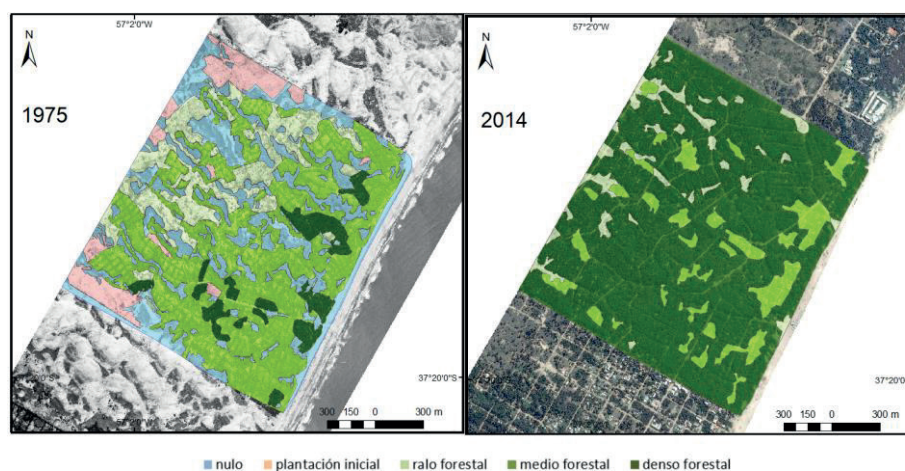


Fig. 4. Uso del suelo para 1975 y 2014.

Tabla 1. Usos del suelo en los años 1975 y 2014

Categoría	Área (%)	
	1975	2014
nulo	25,8	0,0
plantación inicial	7,5	0,0
ralo forestal	14,2	5,7
medio forestal	45,6	11,3
denso forestal	6,9	83,0
total	100	100

Las imágenes analizadas muestran el desarrollo de la forestación a lo largo de 39 años. Los cambios en la representación de las distintas categorías de uso del suelo indican un efectivo proceso de forestación, dado que, hacia el final del período, gran parte de la localidad se encuentra cubierta por un bosque bien desarrollado. Esto implica cambios en la disposición original de las superficies forestales, que debían ubicarse en las dunas costeras, no en las zonas de interduna. En 1975, el 96,0% de las áreas de interduna presentan un uso nulo, sin embargo, en 2014 la forestación ha ocupado por completo las zonas de interduna, con un predominio de la clase denso forestal (62,9%) (Fig. 5b). Las áreas de dunas costeras se encuentran ya forestadas en 1975, con un 56,5% de su superficie cubierta por el uso medio forestal, y las otras cuatro clases de

uso ocupando el 43,5% restante. En 2014, el 87,4% de la superficie de dunas costeras se halla cubierta por el uso denso forestal (Fig. 5c).

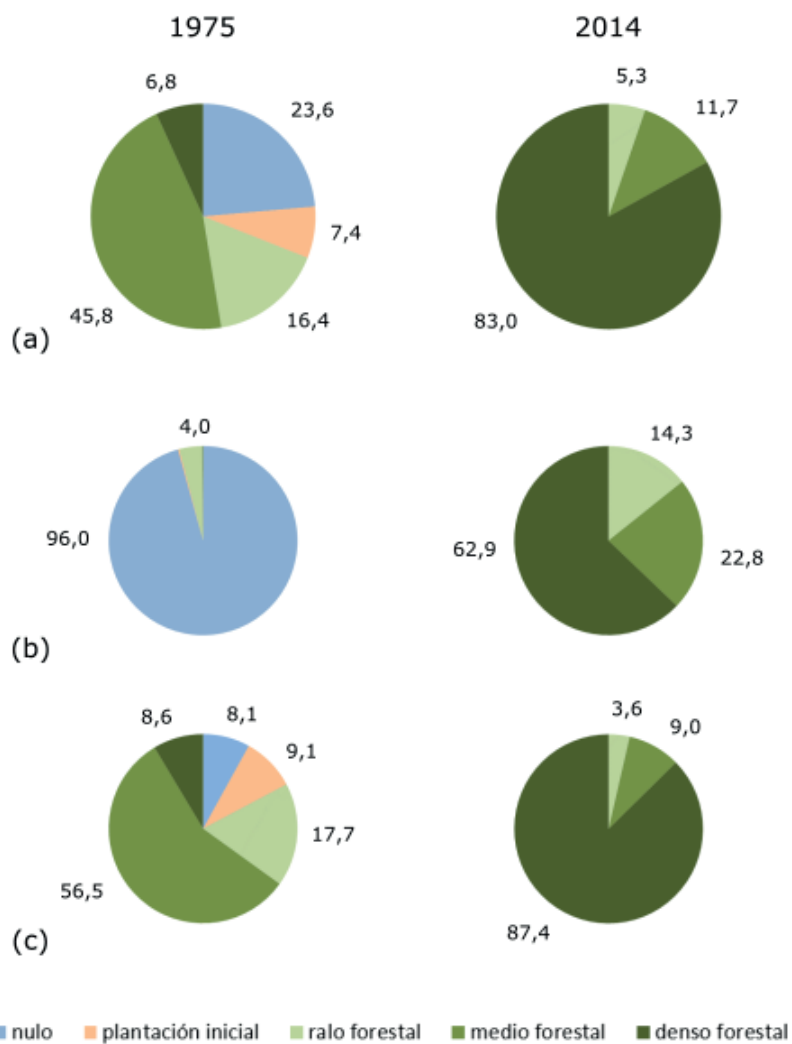


Fig. 5. Usos del suelo en 1975 y 2014, (a) en el área total de mapeo, (b) en las interdunas y (c) en las dunas costeras.

3.2 Evolución de las Superficies de Recarga

De acuerdo al criterio adoptado y la relación existente entre las clases de uso del suelo y las clases asignadas a la recarga, la Fig. 6 muestra la distribución de las superficies de recarga en 1975 y 2014.

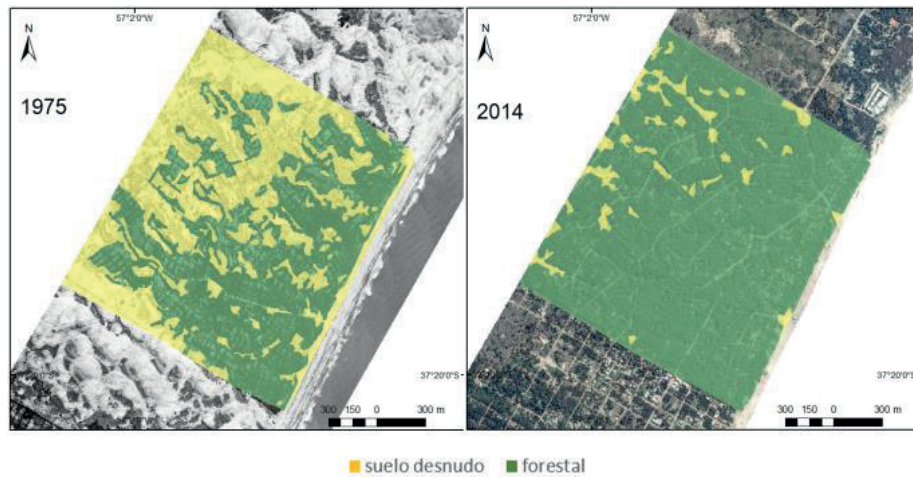


Fig. 6. Distribución de las superficies de recarga en 1975 y 2014.

En el año 1975, las clases suelo desnudo y forestal se encuentran casi igualmente representadas, con un 48 y un 52% de la superficie mapeada, respectivamente. En el año 2014, la clase forestal predomina ampliamente con un 94% de la superficie, mientras que la zona de suelo desnudo representa el 6% restante (Fig. 7).

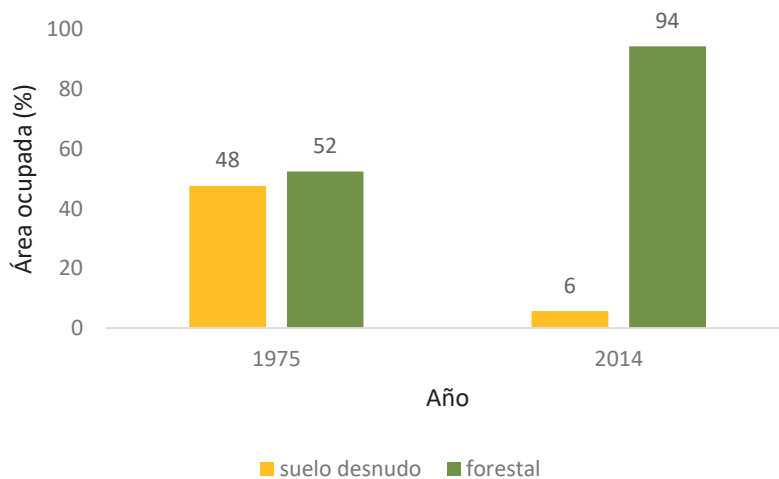


Fig. 7. Distribución porcentual de las clases de uso de suelo relacionadas a la recarga

Lo expuesto evidencia una clara tendencia a la expansión de la zona forestal, a expensas de la zona de suelo desnudo. Esto trae consecuencias sobre el ciclo hidrológico, dado que la capacidad de recarga asociada a la cobertura forestal es menor que la del suelo desnudo (Tabla 2).

Tabla 2. Datos promedio del balance hídrico para el periodo 1997-2016

Pe- riodo	P ¹ (mm)	suelo desnudo			forestal		
		ETP ² (mm)	ETR ³ (mm)	Exce- sos (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Exce- sos (mm)
1997- 2016	930	669	506	422	912	711	223

¹Precipitación, ²Evapotranspiración Potencial, ³Evapotranspiración Real

El promedio de precipitación anual es de 930 mm. Se aprecia casi el doble de excesos en la cobertura de suelo desnudo respecto de la forestal, con 422 mm y 223 mm anuales, respectivamente.

El volumen de agua que habría ingresado al sistema en el año 1975 es de 5,58 hm³ en la zona de suelo desnudo y de 3,25 hm³ en la zona forestal, lo cual suma una recarga total de 8,83 hm³. Para el año 2014 la zona de suelo desnudo se encuentra drásticamente disminuida, y sólo aporta un volumen de 0,67 hm³ a la recarga total, mientras que la zona forestal, ampliamente representada, presenta un volumen de recarga de 5,84 hm³. La recarga total es de 6,51 hm³, lo cual constituye una disminución del 26% respecto al valor de recarga de 1975 (Fig. 8).

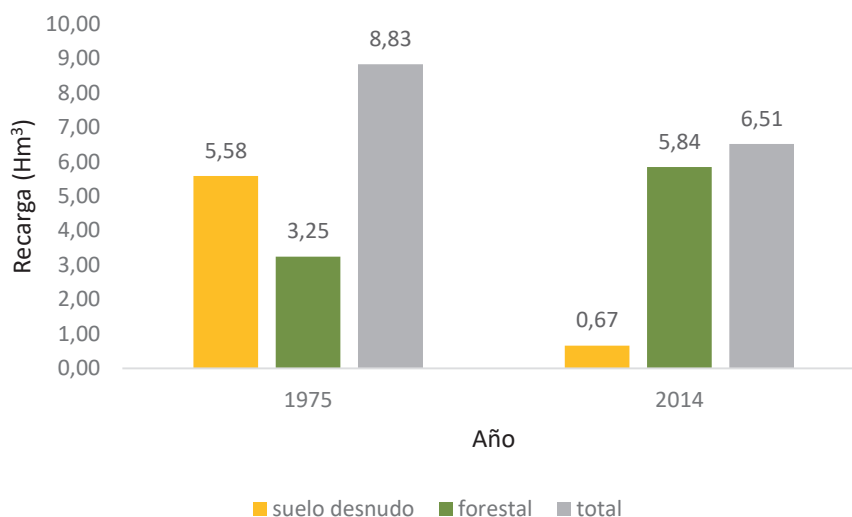


Fig. 8. Volumen de recarga para cada uso de suelo en los años estudiados

4 Conclusiones

Se realizó un análisis de la evolución de la cobertura del suelo en la localidad de Mar de las Pampas, Provincia de Buenos Aires, Argentina, entre los años 1975 y 2014.

Los resultados indican que las zonas forestales, inicialmente distribuidas en las dunas costeras, pasaron a ocupar las interdunas con el avance del tiempo. En 1975, casi la totalidad de las áreas de interduna correspondían a la clase de uso del suelo nulo, mientras que, en 2014, se encuentran enteramente cubiertas por forestación.

Considerando la superficie total de mapeo, la forestación muestra un claro aumento en su densidad a lo largo de la serie analizada. Entre los años 1975 y 2014, las clases de uso del suelo nulo y plantación inicial desaparecen, las clases ralo y medio forestal disminuyen su representación, y la clase denso forestal aumenta drásticamente, pasando de ocupar un 6,9% del área de mapeo en 1975, a un 83% de la misma en 2014.

En el año 1975, la forestación se hallaba en una etapa inicial y la superficie de recarga de suelo desnudo (compuesta por los usos nulo, plantación inicial y ralo forestal) ocupaba un 48% de la superficie. Sin embargo, la expansión del área forestada y el desarrollo de los árboles promovió la ocupación casi total de la zona por parte de la superficie de recarga forestal (categorías denso y medio forestal) para el año 2014. La disminución progresiva del área de suelo desnudo, que presenta un valor promedio de excesos de 422 mm, y el consecuente aumento del área forestal, con un promedio de excesos de 223 mm, modificó las condiciones hidrológicas superficiales de Mar de las Pampas. Se estimó que la recarga total en toda la superficie de la localidad varió de 8,83 hm³ en 1975 a 6,51 hm³ en 2014, lo cual representa una disminución del 26%.

Las diferencias en excesos de agua a causa de la forestación modifican significativamente la recarga en la localidad costera de Pinamar [21], que se ubica a pocos kilómetros y comparte características geomorfológicas y geohidrológicas con la zona de estudio. El presente estudio permite comprobar que la forestación también afecta la dinámica del agua subterránea en Mar de las Pampas, y produce una disminución de las reservas de agua dulce respecto de las condiciones originales del sistema. Mar de las Pampas aún no cuenta con cloacas, lo que puede ocasionar problemas de contaminación del acuífero por filtración de agua desde los pozos ciegos particulares. La combinación de este aspecto con las disminuciones en la recarga por causa de la expansión de la forestación, debe ser tenida en cuenta para lograr una planificación sustentable del recurso hídrico en la localidad.

La zona de estudio presenta un bosque de especies forestales exóticas (coníferas), originalmente instaurado con la finalidad de fijar las dunas para la construcción. Este bosque tiene, a su vez un valor paisajístico que actualmente es explotado, debido a la naturaleza turística de la localidad. Por otro lado, el presente trabajo demuestra el impacto negativo de la implantación de este bosque sobre la recarga del acuífero costero, en una zona donde el recurso hídrico subterráneo es limitado. Si bien se reconoce la importancia que actualmente reviste el bosque de coníferas para usos recreativos, el cuidado del agua subterránea debe ser incluido como prioridad a la hora de considerar la calidad ambiental de la zona. Se recomienda evitar la expansión de las coníferas en zonas donde aún no predominen, y en el caso de futuras expansiones de la zona forestada, recurrir a especies autóctonas para la fijación de dunas.

Referencias

1. López, R., Marcomini, S. (Comps.): Problemática de los ambientes costeros. Sur de Brasil, Uruguay y Argentina. Editorial Croquis, Buenos Aires (2011).
2. Cozzolino, D., Greggio, N., Antonellini, M., Giambastiani, B.: Natural and anthropogenic factors affecting freshwater lenses in coastal dunes of the Adriatic coast. *J Hydrol* 551, 804-818 (2017).
3. Abd El-Kawy, O. R., Rød, J. K., Ismail, H. A., Suliman, A. S.: Land use and land cover change detection in the western Nile delta of Egypt using remote sensing data. *Appl Geogr* 31(2), 483-494 (2011).
4. Were, K. O., Dick, Ø. B., Singh, B. R.: Remotely sensing the spatial and temporal land cover changes in Eastern Mau forest reserve and Lake Nakuru drainage basin, Kenya. *Appl Geogr* 41, 75-86 (2013).
5. Huang, J., Gilmore Pontius, R.Jr., Li, Q., Zhang, Y.: Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China. *App Geog* 34, 371-384 (2012).
6. Shalaby, A., Tateishi, R.: Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Appl Geogr* 27, 28-41 (2007).
7. Tulbure, M. G., Broich, M.: Spatiotemporal dynamic of surface water bodies using Landsat time-series data from 1999 to 2011. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 79, 44-52 (2013).
8. Xie, Y., Gong, J., Sun, P., Xie, Gou, X.: Oasis dynamics change and its influence on landscape pattern on Jinta oasis in arid China from 1963a to 2010a: integration of multi-source satellite images. *Int J Appl Earth Obs* 33, 181-191 (2014).
9. Bobba, A. G., Bukata, R. P., Jerome, J. H.: Digitally processed satellite data as a tool in detecting potential groundwater flow systems. *J Hydrol* 131, 25-62 (1992).
10. Salama, R. B., Tapley, I., Ishii, T., Hawkes, G.: Identification of areas of recharge and discharge using Landsat-TM satellite imagery and aerial photography mapping techniques. *J Hydrol* 162, 119-141 (1994).
11. Ghayoumian, J., Saravi, M., Feiznia, S., Nouri, B., Malekian, A.: Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *J Southeast Asian Earth Sci* 30, 364-374 (2007).
12. Weng, Q.: Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *J Environ Manage* 28(6), 737-748 (2001).
13. Moukana, J. A., Koike, K. Geostatistical model for correlating declining groundwater levels with changes in land cover detected from analyses of satellite images. *Comput and Geosci* 34, 1527-1540 (2008).
14. Kuvan, Y.: The use of forests for the purpose of tourism: the case of Belek Tourism Center in Turkey. *J Environ Manage* 75, 263-274 (2005).
15. Sahin, V., Hall, M.J.: The effects of afforestation and deforestation on water yields. *J Hydrol* 178(1-4), 293-309 (1996).
16. Buytaert, W., Iniguez, V., De Bièvre, B.: The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean paramo. *Forest Ecol Manage* 251, 22-30 (2007).
17. Mollema, P.N., Antonellini, M., Gabbianelli, G., Galloni, E.: Water budget management of a coastal pine forest in a Mediterranean catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy). *Environ Earth Sci* 68(6), 1707-1721 (2013). doi: 10.1007/s12665-012-1862-1
18. Carretero, S., Kruse, E.: Evolución del médano costero y efectos sobre la recarga en el acuífero freático en San Clemente del Tuyú. In: V Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, 105-115. UniRío, Córdoba (2012).

19. Carretero, S., Kruse, E., Rojo, A.: Condiciones hidrogeológicas en Las Toninas y Santa Teresita, Partido de La Costa. In: *Temas actuales en hidrología subterránea* 29-36. EDULP, La Plata (2013).
20. Carretero, S., Braga, F., Kruse, E., Tosi, L.: Temporal analysis of the changes in the sand-dune barrier in the Buenos Aires Province, Argentina, and their relationship with the water resources. *Appl Geogr* 54, 169-181 (2014).
21. Rodrigues Capitulo, L., Carretero, S., Kruse, E.: Impact of afforestation on coastal aquifer recharge. Case study: eastern coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environ Earth Sci* 77(3), 1-14 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7258-0>
22. INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas [online], <http://www.indec.gov.ar>, last accessed 2020/7/2
23. Violante, R., Parker, G.: Estratigrafía y rasgos evolutivos del Pleistoceno medio a superior – Holoceno en la llanura costera al sur de Villa Gesell, Provincia de Buenos Aires. *R Asoc Geol Argent* 47(2), 215-228 (1992).
24. Violante, R., Parker, G., Cavallotto, J.L.: Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la Bahía Samborombón y la laguna Mar Chiquita durante el Holoceno. *R Asoc Geol Argent* 56(1), 51-66 (2001).
25. Bértola, G.R., Isla, F.I., Cortizo, L.C., Turno Orellano, H.A.: Modelo sedimentario de la barrera medanosa al norte de Villa Gesell (provincia de Buenos Aires) – de aplicación hidrogeológica. *Lat Am J Sedimentol Basin Anal* 9(2), 109-126 (2002).
26. Marcomini, S.C.: Morfodinámica, sedimentología, geomorfología ambiental y sus alteraciones antropogénicas en costas de dunas del noreste de la provincia de Buenos Aires. Tesis de Doctorado. 360 pp, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires (2002).
27. Consejo Federal de Inversiones.: Evaluación del recurso hídrico subterráneo en la región costera atlántica bonaerense. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires (1990).
28. Rodrigues Capítulo, L.: (2015) Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la provincia de Buenos Aires. Caso de estudio: Pinamar (Geohydrological evaluation in the eastern coast of the Province of Buenos Aires. Case of study Pinamar), Doctoral thesis, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, La Plata.
29. Hurtado, H., Meleguer, E., Werner, N.: Prospección hidrogeológica por métodos geoeléctricos en el acuífero de Villa Gesell. Aplicación del programa CORTES. Convenio INCYTH-Municipio de Villa Gesell, Ezeiza. 31 pp (1987).
30. Thornthwaite, C., Mather, J.: The water balance. *Climatol* 8, 1–37 (1955).
31. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.: Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). *FAO Irrigation and Drainage*. 56, 327 pp (1998).
32. Falasca, S., Forte Lay, J.A.: Actualización de la evapotranspiración de referencia por el método de Penman–Monteith en la República Argentina. In: *Congreso de AADA*, La Plata, Argentina (2006).
33. Forte Lay, J.A., Aiello, J.L., Kuba, J.: Software AGROAGUA v.5.0. AGROAGUA, Veterinik, Serbia (1995).