

Elementos hidrodinámicos para la explotación sostenible de acuíferos en cordones de dunas en la provincia de Buenos Aires, Argentina

J.N. Santa Cruz y A. Silva Busso

Instituto Nacional de Agua y Ambiente, Subsecretaría de Recursos Hídricos.
Autopista Ezeiza-Cañuelas. Tramo J. Newbery Km 1,620, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.
E-mail: pntsas@ina.gov.ar

RESUMEN

Ensayos de bombeo de larga duración han permitido disponer de los parámetros hidráulicos necesarios para predecir en principio el comportamiento y evolución de los niveles piezométricos producto de la explotación del acuífero libre de la región costera de la Provincia de Buenos Aires contribuyendo a un manejo de los recursos subterráneos en el área. Se han determinado los perímetros de protección de los pozos sobre la base de los resultados de los ensayos hidráulicos y a partir de la ecuación de Theis para las isócronas. Por último se presentan pautas de control de las depresiones y caudales de explotación.

Palabras clave: Argentina, Hidrodinámica subterránea, Hidrogeología, Iberoamérica, protección de Acuíferos

Hydrodynamics elements to sustainable exploitation in dunes coastal aquifers in the Buenos Aires State, Argentine.

ABSTRACT

The dune coastal region in Buenos Aires province, Argentine, possesses geologic and hydrogeologic characteristics that differentiates it, allowing to consider the same like a hydrogeologic Sub-region typical (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

More detailed previous studies has been carried out for the CFI, (1990) in the area between Cape Rasa and Cape Médanos. The information obtained in this study allowed to provide of the necessary data hydraulic in order to predict the behavior and evolution of the levels to consequence of the exploitation of the phreatic aquifer contributing to know of the groundwater resources in the area. The wells protection parameters based on the results of the hydraulic rehearsals and validating the equation of Theis for the isochrones.

Key words: Aquifers protect, Argentine, Groundwater hydrodynamic, Hydrogeology, Latin America

Introducción

Características geológicas e hidrogeológicas del área de estudio

El área de estudio está ubicada en el límite occidental de la localidad de Nueva Atlantis, cercana a la ciudad de Mar de Ajó, (ver figura 1). La Subregión Hidrogeológica IV "Médanos Costeros" de la provincia de Buenos Aires posee características geológicas e hidrogeológicas que la diferencian, permitiendo considerar a la misma como una subregión hidrogeológica típica (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

La fisiografía del área es característica del borde oriental de la Pampa Húmeda y geomorfológicamen-

te corresponde a la "planicie costera" de poco relieve y baja pendiente ($1 \cdot 10^{-4}$) hacia el mar (Sala *et. al.*, 1983). A lo largo de la costa y paralelo a ella se dispone un cordón de dunas de varios kilómetros de ancho y de gran continuidad norte-sur. Su topografía se encuentra entre los 8 m.s.n.m. hasta 12 m.s.n.m. constituyendo una "barrera" topográfica natural dificultando la desembocadura de los arroyos y anarquizando la red regional de drenaje (Parker, 1980). La consecuencia es que la escorrentía superficial retarda su llegada al mar y las aguas suelen acumularse naturalmente al oeste de las dunas formando lagunas e incluso inundando vastas zonas, y consecuentemente aumenta la salinidad del agua del acuífero libre.

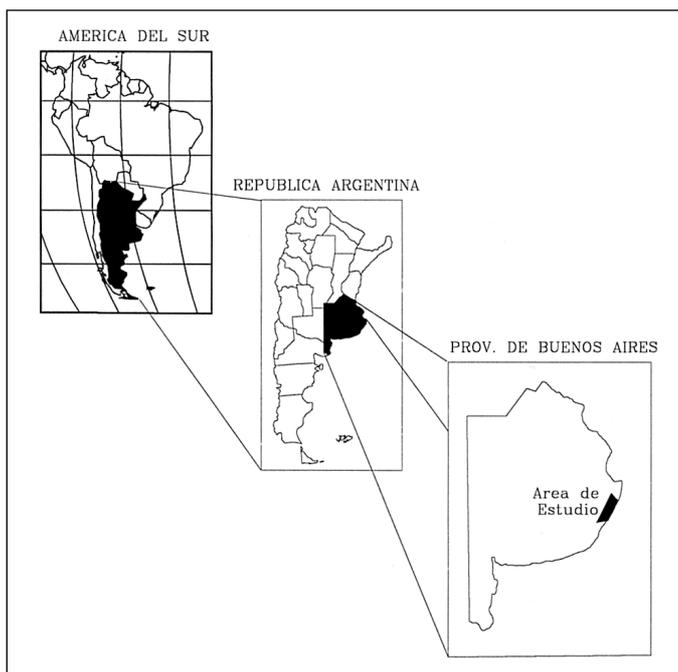


Fig. 1. Ubicación del área de estudio
Fig. 1. Ubication Map

Climatología

El acuífero libre, principal objeto de este trabajo, se recarga directamente de las precipitaciones en un clima que según la clasificación de Thornthwaite corresponde al tipo B1, o sea húmedo y al tipo "r" o sea que diferencias de excesos hídricos son pocas o nulas.

Las precipitaciones máximas mensuales son siempre superiores a los 100 mm y las mínimas presentan valores inferiores a los 24 mm, llegando a ser nulas.

En el área se puede considerar una precipitación media anual cercana a los 1000 mm, con gran influencia marina que contribuye a reducir la evaporación por acción del viento. El balance hídrico de la región a través de los métodos de Thornthwaite y Mather determinan una evapotranspiración potencial anual media que comprendió entre 700-750 mm valores muy similares a la evapotranspiración real media (CFI, 1990).

Los excedentes medios anuales varían entre los 150-300 mm y los pequeños déficit se producen de Diciembre a Febrero con valores de entre 6 y 13 mm, (CFI, 1990).

Geología e Hidrogeología general

La región se caracteriza por la ausencia de aflora-

mientos anteriores al Cuaternario, una gran uniformidad en la estratigrafía del subsuelo y no posee vinculación con áreas orogénicas. El conjunto de sedimentos de interés hidrogeológico está comprendido desde edades holocenas hasta plio-pleistocenas y constituyen un paquete sedimentario originado en procesos continentales (lacustres, fluviales y eólicos) y marinos en relación con los sucesivos cambios del nivel de base durante dichas edades (CFI, 1990).

Hacia el oeste afloran los Sedimentos Pampeanos, limos de origen eólico, que pueden tener entre 30 y 60 metros de espesor y probablemente sean subyacentes a los niveles descritos anteriormente. Se describen a continuación las unidades geológicas de importancia hidrogeológica del área de estudio.

Desde el punto de vista hidrogeológico la Formación Pozo 17 (Parker, 1979) constituye los niveles de mejor permeabilidad y contiene al acuífero libre o freático de la región. La Formación Pozo 17 (op.cit.) fue dividida en dos facies, una la denominada Mar de Ajó y la otra facie denominada La Ernestina.

La facies Mar de Ajó esta integrada por arenas de color castaño amarillentas con intercalaciones de niveles de conchas y grava fina. Conforman una disposición cordoniforme con morfología de crestas de playa. El ambiente de sedimentación ha sido interpretado como un sistema de barreras litorales durante una etapa de regresión (Parker, 1979).

La facies La Ernestina es de litología similar con predominio de arenas finas y menor proporción de conchilla y grava, también con relación a ambientes de playa (Parker, 1979).

La Formación Punta Médanos (Parker, 1979) se sobrepone a la secuencia descrita y corresponde a arenas finas y en parte medianas, de color castaño amarillento y restos conchiles que conforman las típicas dunas costeras. Se extiende casi sin interrupción en sentido Norte-Sur paralelo a la línea de costa y con 3 ó 4 kilómetros de ancho Este-Oeste. Ambas Formaciones Pozo 17 y Punta Médanos son las continentes del acuífero libre en el área de estudio. Por debajo se encuentra el complejo acuífero semiconfinado cuya base es la Formación Pozo 8 o Facie La Victoria constituida por arcillas de color verde grisáceas con escasas intercalaciones arenosas (Parker, 1979).

Subyace a este secuencia un limo arenoso con intercalaciones de arena muy fina de color castaño amarillento de hasta 5 metros de espesor. Este nivel ha sido denominado Formación Buenos Aires. Hacia la base de la secuencia continúa con arenas muy finas, finas hasta medianas denominada Formación Pozo N°10 (CFI, 1990).

El basamento hidrogeológico en este estudio, infrayace a la secuencia anterior y se constituye de un paquete de arcillas plásticas de color verde grisáceas con fragmentos de conchas (CFI, 1990).

Hidrodinámica general

La geomorfología ejerce un importante control sobre el comportamiento hidrodinámico del sistema acuífero. Los mapas de isopiezas (CFI, 1990) evidencian una divisoria de aguas subterráneas de sentido Norte-Sur que diverge levemente hacia el sureste al sur de Mar de Ajó y siempre coincidente con las alturas más significativas del cordón costero. Los niveles estáticos regionales varían entre 2 m.s.n.m en el norte en Nueva Atlantis a 9 m.s.n.m. hacia el Sur cerca de Punta Médanos (figura 2).

Considerando lo expuesto desde el área de recarga el flujo se orienta hacia dos direcciones opuestas: una hacia el mar y otra hacia la terraza baja al oeste del cordón de dunas. El flujo subterráneo en dirección al mar posee valores de gradiente hidráulico entre

1.10^{-3} y 2.10^{-3} y los gradientes hacia el oeste disminuyen casi hasta 5.10^{-4} . La geometría de la superficie piezométrica es elíptica cilíndrica con tendencia radial divergente y el espesor de la zona de aireación (entre 1 y 3 metros) aumenta en los sectores elevados disminuyendo del este al oeste (CFI,1990). El espesor saturado del acuífero y el espesor saturado sobre el nivel del mar presenta diferencias aumentando de norte y sur (Mar de Ajó-Punta Médanos) y disminuyendo hacia el este y oeste a partir de los sectores más elevados de la región (CFI, 1990).

El acuífero libre está limitado en el sentido longitudinal, y a ambos lados (mar y continente), por agua salobre-salada. Los niveles estáticos presentan diferencias entre 0,3 a 0,5 metros.

El acuífero semiconfinado presenta mejores condiciones de explotación hacia el sur siendo recargado exclusivamente por el acuífero libre superior. Las diferencias litológicas condicionan su recarga y la descarga suele ser hacia el mar y hacia el oeste en menor magnitud (CFI, 1990).

Las reservas de la región han sido estimadas para una zona comprendida desde el Sur de Mar de Ajó

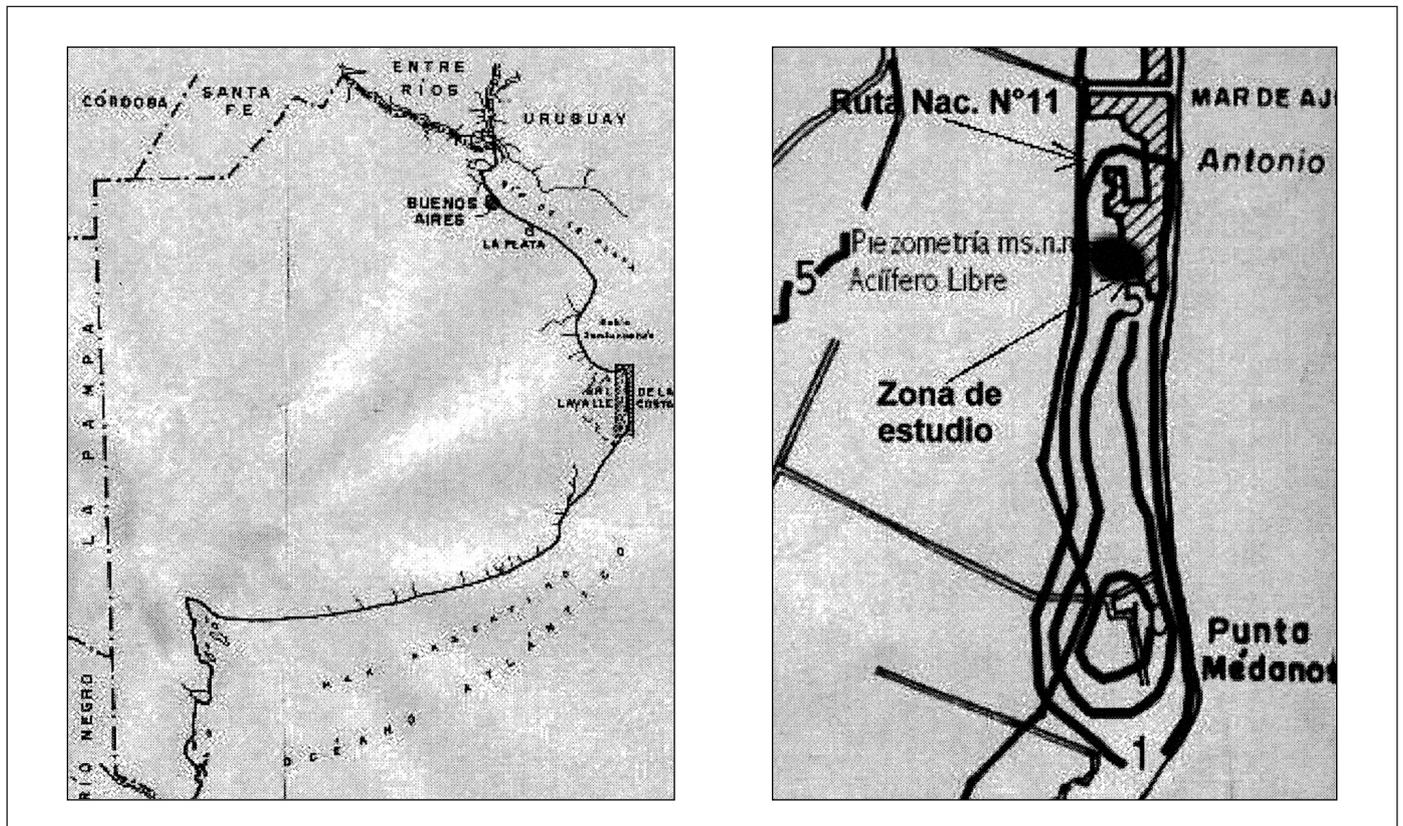


Fig. 2. Mapa piezométrico de la Zona de Nueva Atlantis
Fig. 2. General piezometric map in Nueva Atlantis area

hasta Punta Médanos en 75 Hm³ con unos recursos de 23 Hm³/año. En principio, el acuífero libre presenta una alta vulnerabilidad general, dado el poco espesor de la zona de aireación y el carácter psamítico de los sedimentos.

Metodología del estudio hidrodinámico

El estudio se ha realizado en una parcela piloto de unos 0,5 km² donde se han efectuado un conjunto de perforaciones para la construcción de captaciones de estudio y piezómetros. Cinco perforaciones se sitúan en el acuífero libre, numeradas correlativamente (ver figura 3).

La captación 5 se ubica en el centro de la batería de bombeo y las cuatro restantes equidistan de la misma 250 metros formando un ángulo en planta de 90°. Las captaciones periféricas (1, 2, 3, 4) tienen una distancia lineal entre sí de 350 metros. De tal forma que la captación 4, ubicada más al este, dista 1000 metros de la línea de costa y la captación 2 más al oeste dista a 1500 metros de la línea de costa. El piezómetro PZ2 está situado a 10 metros de la captación 5 y registra específicamente al acuífero semiconfinado subyacente. Los piezómetros del acuífero libre y semiconfinado (PZ2) pueden observarse en la figura 3, y se han ubicado linealmente en la dirección N-S y NO-SE a partir de la captación 5. Los piezómetros al

acuífero libre se separan progresivamente de la captación 3 y 5 a las siguientes distancias:

Piezómetro	Distancia al N°5 (m)	Piezómetro	Distancia al N°3 (m)
Pz5/1	5	Pz3/1	30
Pz5/2	175	Pz3/2	100
Pz5/3	275	Pz3/3	150
Pz5/4	375	Pz3/4	300
Pz5/5	550		

Tabla 1. Ubicación de piezómetros
Table 1. Piezometers ubication

Además se ha ubicado un piezómetro hacia el este de la captación 4 (Pz4/1) distante 150 metros de esta última. Las perforaciones de bombeo de números 1 al 5 tienen alrededor de 15 metros de profundidad y el piezómetro PZ2 alcanza los 25 metros de profundidad. Los piezómetros tienen profundidades similares a las captaciones.

La batería de captaciones de bombeo y red piezométrica permitió realizar ensayos de bombeo a régimen permanente y régimen variable.

Resultados y discusión

Considerando los antecedentes y la red piezométrica diseñada en el predio de bombeo se realizaron dos ensayos a régimen variable (caudal constante) y permanente (caudal variable).

Ensayos de bombeo a régimen permanente

Los ensayos de bombeo a régimen permanente se realizaron con tres escalones, el primero con un caudal de 15 m³/h y el segundo con un caudal de 30 m³/h y el tercero con un caudal de 45 m³/h. Este ensayo se realizó en las captaciones 1, 2, 3 y 4 (ver figura 3) en forma independiente para cada una de ellas sucesivamente exceptuando la captación 5. Se realizaron las lecturas de descensos en cada captación destinadas al futuro abastecimiento. Los descensos (ds) y caudales específicos de cada escalón (Qe) en cada pozo se detallan según:

Captación	Bombeo a 15 m ³ /h		Bombeo a 30 m ³ /h		Bombeo a 45 m ³ /h	
	ds(m)	Qe(m ³ /h.m)	ds(m)	Qe(m ³ /h.m)	ds(m)	Qe(m ³ /h.m)
1	2.18	6.88	4.07	7.37	6.08	7.40
2	1.96	7.65	3.61	8.31	5.01	8.98
3	1.56	9.6	3.29	9.11	4.55	9.89
4	1.26	11.90	2.71	11.07	4.14	10.87

Tabla 2. Descenso y capacidad específica
Table 2. Drawdown and Specific Capacity

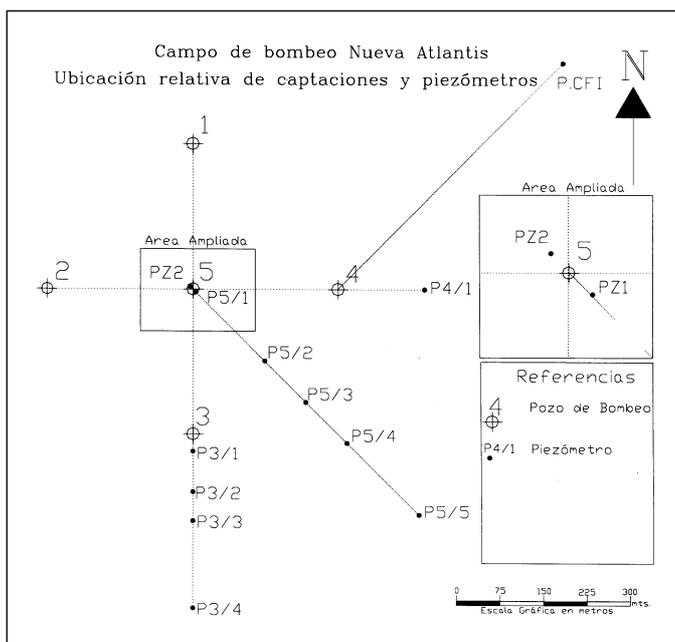


Fig. 3. Campo de bombeo en Nueva Atlantis
Fig. 3. Study Pumper Field in Nueva Atlantis

La figura 4 muestra la relación Caudal vs. Depresión para las captaciones 1, 2, 3 y 4. Como puede observarse las captaciones tienen una relación similar entre sí, independientemente de los valores absolutos del caudal específico en cada una de ellas.

La figura 4 indica una función lineal de la relación caudal/depresión en los pozos que es propia de un medio bastante homogéneo e isótropo. En la captación 5 se realizó el ensayo a régimen permanente con el objeto de definir los caudales del ensayo a régimen variable que se detallará más adelante.

En este caso se realizó un ensayo previo a régimen permanente con dos escalones uno de 40 m³/h y otro de 45 m³/h. A partir de estos valores de descensos se calcularon los caudales específicos para la captación 5 solamente:

Bombeo a 40 m ³ /h		Bombeo a 45 m ³ /h	
ds(m)	Qe(m ³ /h.m)	ds(m)	Qe(m ³ /h.m)
5.28	7.57	7.16	6.28

Tabla 3. Descenso y capacidad específica en el pozo 5
Table 3. Drawdown and Specific Capacity in Well 5

Se determinó por lo tanto que, con una disminución del 11% en el caudal de explotación, se obtiene una reducción en los descensos del 27% y el caudal específico aumenta un 17% para cada captación 5. Por tratarse de la captación central de la batería de bombeo y poseer los valores más bajos de caudal específico los ensayos a régimen variable se realizaron sobre la captación 5.

Ensayos a régimen variable

En base a lo expuesto se efectuaron dos ensayos a régimen variable, el primero se realizó durante nueve días (216 horas de bombeo) con un caudal de 45m³/h en la captación 5. Finalizado el mismo se realizó con un ensayo de recuperación. El sistema acuífero recuperó sus niveles originales a los tres días de finalizar el bombeo. El segundo, se efectuó también a régimen permanente con un caudal de 40 m³/h durante un período de 16 días (384 hs.) consecutivos también en la captación 5.

Sobre la base de los ensayos mencionados se realizó la interpretación correspondiente con el objeto de determinar los parámetros hidráulicos del acuífero libre. La figura 4 y 5 presenta los datos de la relación descensos vs. tiempo de bombeo, a partir del cual se empleó el método de Neuman, (1972) que consiste en una revisión de los métodos de Bulton, (1954). Se sustituye el concepto de drenaje diferido por el efec-

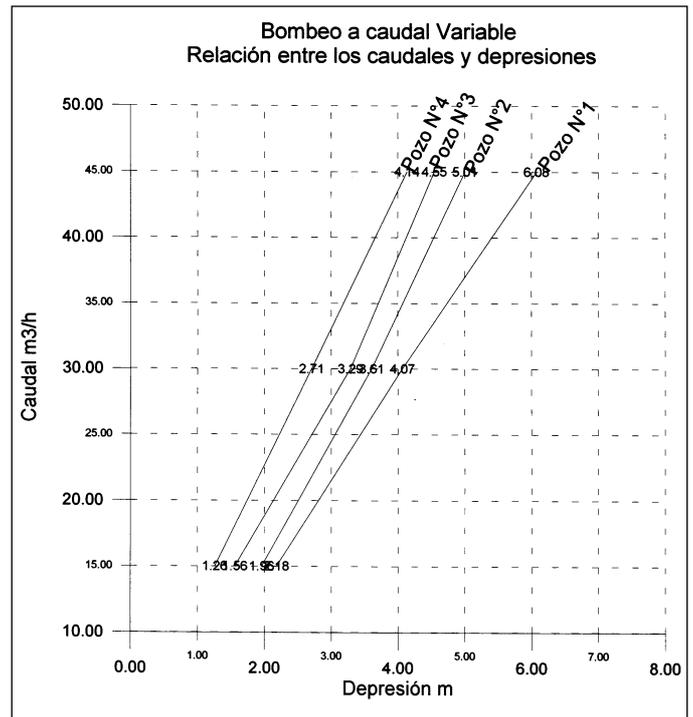


Fig. 4. Relación entre caudales bombeados y descensos
Fig. 4. Drawdown and Pumped Flow relations

to único de la componente vertical de flujo que se origina a partir de la perturbación de las condiciones de equilibrio en la superficie freática (Custodio y Llamas, 1983).

De esta forma se verificó que el acuífero más somero es semilibre o libre con drenaje diferido. Esta determinación ayuda a una mejor comprensión de la hidráulica acuífera en la zona sur de Mar de Ajó, complementando los estudio previos (CFI, 1990) que regionalmente interpretan a este como un acuífero libre.

Los parámetros hidráulicos determinados a partir de los datos del piezómetro más cercano a la captación 5 piezómetro P5/1 a caudales de 40 y 45 m³/h pueden verse en las figuras 5 y 6 que presentan los descensos medidos en los piezómetros sobre las curvas de Neuman, (1972) durante los ensayos de 16 días y 9 días respectivamente.

El promedio de las determinaciones de transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) se han determinado para cada ensayo de bombeo según:

PCaudal de ensayo (m ³ /h)	Transmisividad (m ² /día)	Almacenamiento
45	213	0,21
40	355	0.05

Tabla 4. Acuífero freático. Funciones Hidráulicas
Table 4. Phreatic Aquifer. Hydraulic Functions

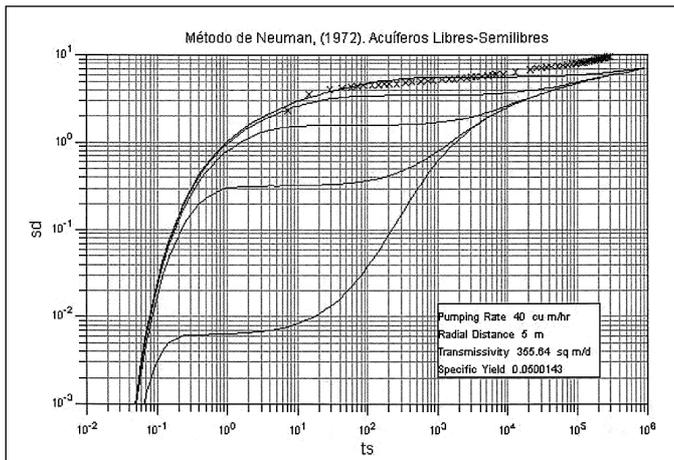


Fig. 5. Ensayo de bombeo a 40 m³/h durante 16 días (Well 5, Pz1)
Fig. 5. Pumping Test to 40 m³/h for 16 days (Well 5, Pz1)

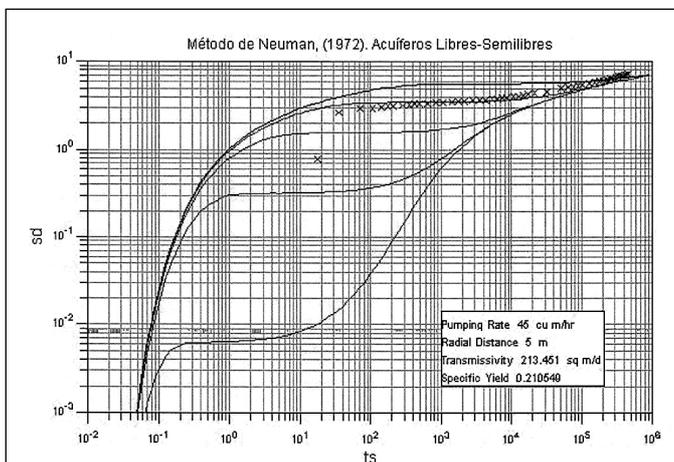


Fig. 6. Ensayo de bombeo a 45 m³/h durante 9 días (Pozo 5, Pz 1)
Fig. 6. Pumping Test to 45 m³/h for 9 days (Well 5, Pz1)

Durante el desarrollo del bombeo de 16 días se registraron dos precipitaciones una de 10 mm y otra de 55 mm, ambas en aproximadamente 12 horas. Este evento climático permitió verificar la gran capacidad de infiltración de los suelos y cuantificar la recarga y recuperación de los niveles dinámicos por precipitaciones a partir de las mediciones en los piezómetros. Estos valores fueron empleados para corregir las medidas en los piezómetros. La siguiente tabla muestra los valores de recuperación en los niveles dinámicos:

Precipitación en mm	Incremento del ND (m)
10	0,002 - 0,04
55	0,23 - 0,4

Tabla 5. Correcciones del incremento del nivel dinámico en función de la precipitación
Table 5. Precipitations corrections of increments

Geometría del cono de depresión

La piezometría natural (sin bombes) de la zona de estudio puede observarse en la figura 7, siendo la dirección dominante de flujo natural hacia el sudeste con un gradiente hidráulico entre 210^{-3} y 410^{-3} .

La geometría del cono de depresión en torno al pozo de bombeo ha sido determinada a partir de la información tomada en los piezómetros. En la figura 8 se observa la piezometría después de quince días de bombeo con un caudal de 40m³/h, acusando los cambios en la dirección de flujo (comparar con la configuración del mapa de la figura 7). En este caso el gradiente hidráulico es de $2,5 \cdot 10^{-2}$. En la figura 9 se observa la piezometría después de nueve días de bombeo con un caudal de 45 m³/h. En este caso el gradiente hidráulico es de $3,6 \cdot 10^{-2}$ o sea un 70% mayor que el anterior y con un ápice 0,5m más profundo que el mapa de la figura 8.

En el acuífero freático predominan las aguas con residuo seco menor a 600 mg/dm³. Los bicarbonatos se encuentran entre los 200-600 mg/dm³ y los cloruros y sulfatos menos de 100 mg/dm³ predominando las aguas de tipo bicarbonatada cálcica. Los tenores de Hierro total están comprendidos entre los 0,2-1 mg/dm³, y aún más. Los valores más frecuentes de Flúor están entre 0,2-0,4 mg/dm³. Debe aclararse que durante el período de ensayos no se observó ningún cambio en la calidad original del agua subterránea.

El tiempo de llegada del cono de depresión a los diferentes piezómetros para los bombes de 40 m³/h. Los mismos han alcanzado los piezómetros secuencialmente en la dirección del flujo subterráneo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tiempo (min)	Piezómetros	Distancia (m)
60	Pz3/2	100
300	Pz5/1	175
900	Pz5/2	275
1440	Pz5/3	375
1800	Pz5/4	550

Tabla 6. Tiempo de llegada del cono de depresión (descenso 0,01m)
Table 6. Arrive time to cone of depression (drawdown 0,01m)

Propuesta para la determinación de cálculo de isócronas y perímetro de protección

Para la determinación de los perímetros de protección y validación de los métodos de cálculo convencionales se han aplicado los métodos de "radio fijo calculado" atendiendo a las limitaciones propuestas por ITGE (1991). En tal sentido, asumiendo la presencia de un acuífero extenso, el poco diámetro de las

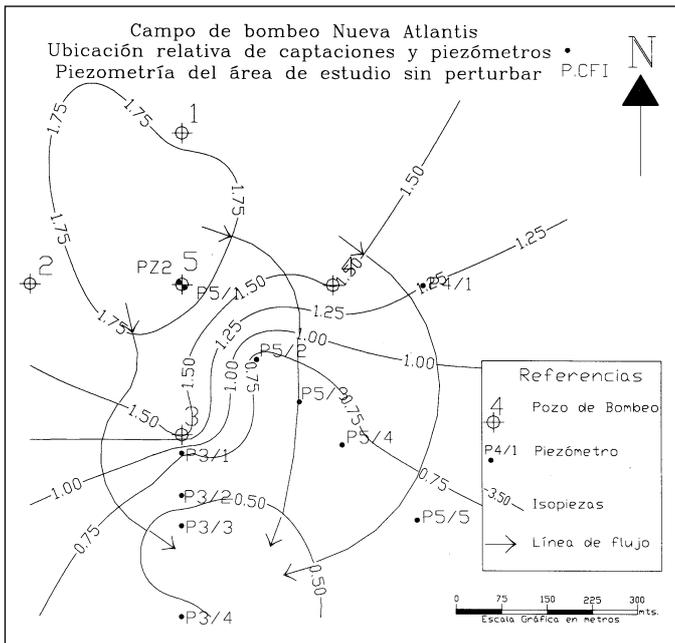


Fig. 7. Nivel freático estático natural
Fig. 7. Natural static phreatic level

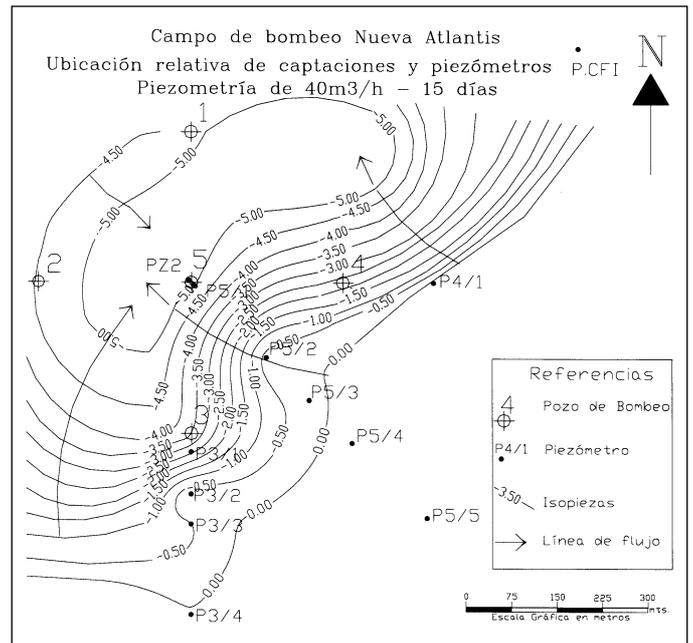


Fig. 8. Nivel del agua tras 15 días de bombeos de 40 m³/h
Fig. 8. Pumping water level for 15 days to 40 m³/h

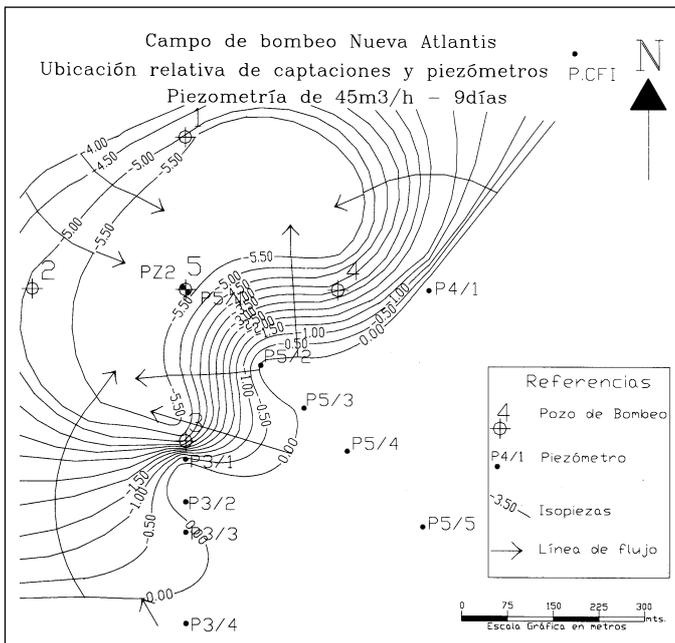


Fig. 9. Nivel del agua tras 9 días de bombeos de 45 m³/h
Fig. 9. Pumping water level for 9 days to 45 m³/h

fieren condiciones, en principio, razonablemente adecuadas para la aplicación de los diferentes métodos y su verificación empírica con los datos tomados en el terreno. Sobre la base de los datos calculados durante los bombeos de Transmisividad, coeficiente de almacenamiento, y gradiente hidráulico se calcularon las distancias de las isocronas correspondientes a los tiempos de llegada en los piezómetros. Se consideró que el método de cálculo más adecuado es aquel que permitió verificar los resultados más aproximados a los tiempos de arribo de los conos, equivalentes a una depresión inicial de 0,01m en el punto de observación.

Para las estimaciones de tiempo de tránsito se asumió que prevalece el proceso de advección, donde el movimiento de traslado del soluto coincide con el del agua en la dirección de flujo subterráneo. Por lo tanto el tiempo de llegada a una captación de un contaminante potencial en solución, desde una distancia determinada es equivalente al tiempo de llegada del cono de depresión desde una captación hasta el contaminante potencial.

Se calcularon tiempos de tránsito sobre la base de los métodos de Bear y Jacob, (1965); Wyssling, (1979) y Hofmann y Lillich, (1973), pero en todos los casos se comprobó que el acuífero era lo suficientemente isotrópico y homogéneo para emplear el método de descensos según la ecuación de Theis. Por otro lado, los resultados calculados a partir de este último coinci-

captaciones (101 mm), relativa homogeneidad e isotropía con respecto a su permeabilidad, ausencia significativa de recargas o componentes verticales de flujo y ensayos de bombeo a caudal constante, con-

den satisfactoriamente con los datos medidos en el terreno. De acuerdo con el método de descensos según Theis puede calcularse la distancia lineal a una isocrona determinada según la ecuación:

$$R = [(u \cdot 4 \cdot T \cdot t) / s]^{1/2}$$

Donde:

R: Distancia a la isocrona de tiempo *t*

u: Función de pozo

T: Transmisividad

t: Tiempo considerado

s: coeficiente de almacenamiento

Empleando los tiempos de llegada de la tabla 6, la Transmisividad calculada, el caudal y la función *u*, se ha calculado el siguiente *R* para cada *t*:

Tiempo (min) (isocrona)	R (m) calculada por Theis. Distancia hasta la isocrona	Distancia (m) Descenso 0,01m
60	102.04	100
300	113.92	150
900	197.33	175
1440	249.6	350
1800	279.06	550

Tabla 7. Comparación entre tiempos de llegada del cono de depresión (descenso 0,01m) y la distancia (R) calculada hasta la isocrona
Table 7. Comparisons between arrive time to cone of depression (drawdown 0,01m) and calculated isocrone distance R

El resultado de *R* en los tiempos de llegada es muy similar a las distancias desde el pozo de bombeo 5 a los piezómetros de observación. Por lo tanto, se considera que el método de descensos de Theis es una aproximación válida y satisfactoria para el cálculo de isocronas y determinación de perímetros de protección en el acuífero libre costero de estas características.

Según las normativas de la EPA, (1987) similares a las empleadas por al CEE, (ITGE, 1991) se recomienda como criterio de zonación tiempos de tránsito de 1 día en zona inmediata a la captación, 60 días como zona próxima y 10 años como zona alejada en función de la degradabilidad de los agentes contaminantes. En el caso del acuífero estudiado aquí las isocronas propuestas correspondería:

Tiempo (isocrona)	Perímetro propuesto	Zona
1 días	250 m	Inmediata
60 días	1900 m	Próxima
10 años	15030 m (15km)	Lejana

Tabla 8. Perímetros de protección en los pozos estudiados
Table 8. Protection perimeters in study wells

Conclusiones

En la zona de estudio el acuífero es libre con comportamiento diferido o semilibre. Esto último está en

relación con la diferencia de permeabilidad entre los materiales superiores de la Formación Punta Médanos y los inferiores de la Formación Mar de Ajó. Pueden considerarse valores representativos de Transmisividad entre 217-354 m²/día y coeficiente de almacenamiento de 0,05.

El acuífero libre posee una rápida dinámica de recuperación al cesar los bombeos. La geometría y evolución del cono de depresión medidos en el terreno permite verificar una extensión importante del mismo a los pocos días de bombeo.

La recuperación por precipitaciones de los niveles piezométricos presenta una dinámica importante con valores significativos. En el pozo de bombeo se ha recuperado hasta un 10% y en los piezómetros distales hasta un 100% con una precipitación de 55 mm.

Se puede considerar en este caso el valor de 40m³/h como máximo caudal sostenible de explotación; y mediando programas de paradas alternativas y estudios específicos en las futuras áreas de bombeo. Las distancias entre pozos deberían estar en el orden de los 400 metros.

La vulnerabilidad del acuífero libre es alta, dado el poco espesor de la zona no saturada y su litología psamítica. Los perímetros de protección y zonificación propuestos para una captación corresponden a los presentados en la tabla 10.

Es de advertir que esta área es atravesada por la Ruta Nac. N°11 que es la principal vía de comunicación (ver figura 2). La misma se encuentra en las zonas de protección próximas e incluso inmediatas a las captaciones. Ante cualquier vertido puntual, por ejemplo, el tiempo de tránsito del contaminante puede ser de pocos días también hay que tener en cuenta la rápida dinámica de recuperación de los niveles piezométricos por el cese de bombeos en concordancia con los tiempos de tránsito de las zonas propuestas. Por otro lado, los núcleos urbanos en el norte del área de explotación se ubican en la zona lejana pero con tendencia de expandirse a las áreas próximas de las captaciones de bombeo. Esto último comprende también la ubicación cercana de repositorios de residuos domiciliarios entre otras actividades relacionadas.

Las características hidráulicas del acuífero aquí expuesto determinan la importancia de realizar programas de bombeo adecuados sobre la base de detallados estudios hidrogeológicos y ajuste de la zonificación con metodologías de simulación matemática y mediciones sistemáticas de niveles y calidades.

Referencias

Bear, J. y Jacobs, M., 1965. On the movement of water

- bodies injected into aquifers. *J. Hydrology* n°1-3, pp.37-57.
- CFI, 1990. Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos de la Región Costanera Atlántica. Región I: Punta Rasa-Punta Médanos. *Informe Final. Consejo Federal de Inversiones Argentino (CFI)*.
- Custodio E. y Llamas M.R., 1983. Hidrología Subterránea. *Editorial Omega*, Segunda Edición, Tomos I y II. Barcelona, España.
- Hofmann, W y Lillch, W., 1973. Problematik der bemessung der engeren schtzzones für lockergesteinsaquifere. Z. Deutsch, *Geol. Gesellschaft* Band 124, 1Add Hannover.
- ITGE, 1991. Guía Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas. *Instituto Tecnológico Geominero de España, Primera Publicación*.
- Parker, G., 1979. Geología de la Planicie Costera entre Pinamar y Mar de Ajó. Prov. de Bs.As. *Rev. de la Asoc. Geol. Arg.* XXXIV.
- Parker, G., 1980. Estratigrafía y Evolución Morfológica en Punta Médanos, Prov. de Bs.As. *CIC*, Mar del Plata, Argentina.
- Sala J.M., González, N y Kruse E., 1983. Generalización Hidrológica de la Provincia de Buenos Aires, *Hidrología de las Grandes Llanuras, UNESCO, Actas del Coloquio*, Volumen II pag. 973-1011.
- Santa Cruz J.N. y Silva Busso A., 1999. Escenario hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional Argentina. *II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea*, Actas Tomo I, pag 461-473, Tucumán, Argentina.
- Santa Cruz J.N., 1991. Factibilidad de Explotación del Cordón Medanoso de Nueva Atlantis, INTAHAR consultores. *Informe Inédito*.
- Wyssling L., 1979. Eine nene form el zur Berechnung der Zuströmungsdaner der grunduaners zu einem Grounduanes Pumpuern. *Eclogee geol. Helv.*72, pp.401-406.

Recibido: Enero 2001

Aceptado: Septiembre 2001