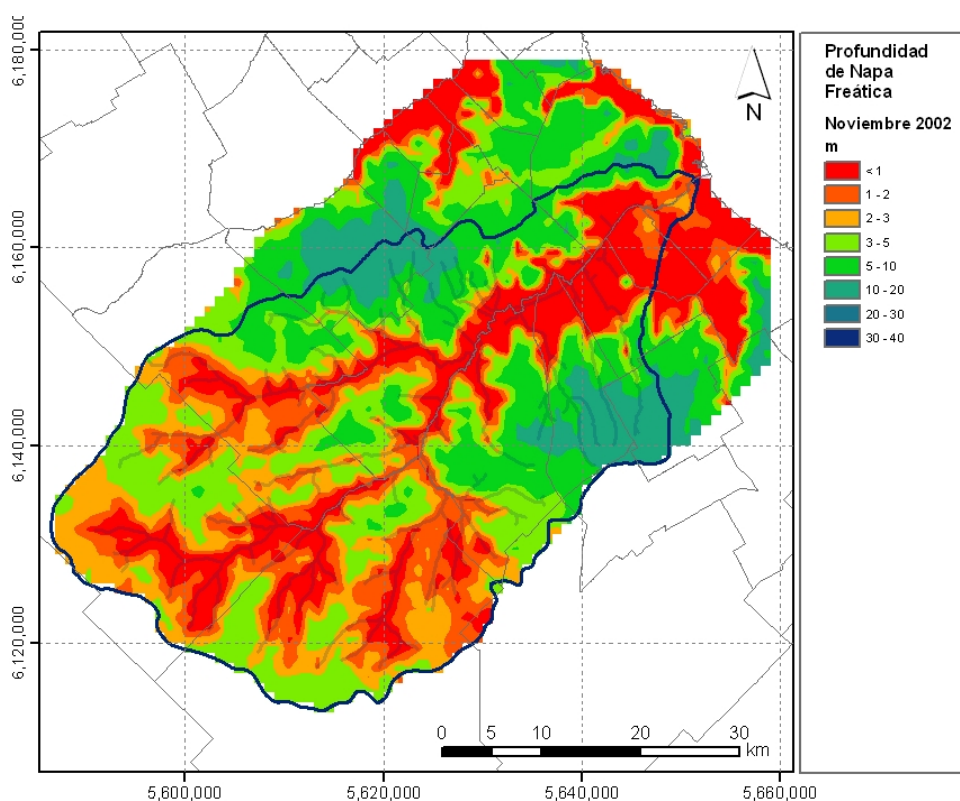


INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA

BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA
CUENCA DEL MATANZA-RIACHUELO
MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA



Proyecto INA 1.207
Informe LHA 01-1.207-10
Ezeiza, Junio, 2010

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE:

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS:

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA:

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL:

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Nicolás BADANO

Fernando RE

RESUMEN

Se describe la implementación, validación y calibración de un modelo hidrológico integrado superficial y subterráneo para la cuenca del Matanza-Riachuelo. Se lo aplica para estudiar los efectos de la urbanización sobre la distribución de niveles freáticos y piezométricos. En particular, se analiza el problema de napas elevadas del Conurbano Sur. Se plantean conclusiones relativas a la gestión del recurso subterráneo y recomendaciones para el uso futuro de esta herramienta.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	2
2.1	Software.....	2
2.2	Dominio	3
2.3	Modelo Digital de Elevación del Terreno	5
2.4	Escorrentía superficial.....	6
2.5	Escurrimiento subterráneo	9
2.6	Intercambio antrópico.....	13
2.6.1	Pérdidas en redes de distribución de agua potable	14
2.6.2	Filtración de pozos negros domiciliarios	14
2.6.3	Extracciones de agua para uso doméstico	16
2.6.4	Extracciones de industrias.....	18
2.6.5	Extracciones de bombas depresoras.....	21
2.6.6	Agregación de intercambios antrópicos	21
2.7	Impermeabilidad	22
2.8	Forzantes.....	28
3	CALIBRACIÓN DEL MODELO	31
3.1	Validación.....	31
3.2	Análisis de sensibilidad.....	45
3.2.1	Conductividad horizontal.....	45
3.2.2	Conductividad vertical	52
3.2.3	Coefficiente de rugosidad de Manning	57
3.2.4	Parámetros de zona no saturada.....	58
3.3	Calibración	66
4	EXPLOTACIÓN DEL MODELO	80
4.1	Cuenca natural.....	80
4.2	Balance de agua de origen antrópico.....	89
4.3	Evolución de cuenca antropizada.....	91
4.4	Análisis de sensibilidad a forzantes	92
4.4.1	Extracciones para grandes industrias.....	92
4.4.2	Bombeo de AySA.....	98

4.4.3	Aportes a pozos negros	104
4.4.4	Pérdidas en la red de distribución de agua.....	104
4.5	Análisis de problemas.....	115
4.5.1	Napas elevadas en el Conurbano Sur	115
4.5.2	Calidad del agua del Puelche en la zona urbanizada.....	115
4.5.3	Efecto de las extracciones industriales	115
5	CONCLUSIONES	116
	REFERENCIAS	118

1 INTRODUCCIÓN

En el marco del Plan Integral de Saneamiento Ambiental de la Cuenca Hídrica Matanza-Riachuelo (PISA), bajo el Contrato celebrado entre la UTN-FRA (Facultad Regional Avellaneda) y la ACuMaR (Autoridad de Cuenca del Matanza-Riachuelo) y el Acta de colaboración entre la UTN-FRA y el INA, se desarrolló un modelo hidrológico-hidráulico integrado para aguas superficiales y subterráneas. Los objetivos del presente estudio fueron varios, a saber:

- Efectuar un balance de agua dinámico a nivel de la cuenca, que permita disponer de una herramienta de gestión del agua subterránea para uso industrial.
- Entender mejor las causas de la elevación de las napas en amplias zonas del conurbano bonaerense, de modo de plantear y analizar medidas de mitigación.
- Construir el soporte para luego modelar la calidad del agua subterránea, y así determinar sus posibilidades de uso.

En este Informe se presentan los resultados de dicho estudio. Se describe el detalle de la implementación del modelo (capítulo 2), que incluye la representación de los procesos asociados tanto al sistema natural como al sistema antrópico, este último fuertemente desarrollado en la cuenca baja. Se muestra la validación y calibración del modelo (capítulo 3), utilizando como referencia los datos hidrométricos relevados. Se lo aplica para efectuar un diagnóstico de situación (capítulo 4), incluyendo la determinación de los efectos de cada uno de los procesos ligados a la urbanización (impermeabilización de la superficie del terreno, bombeos desde los acuíferos freático y confinado, desbordes de pozos negros, pérdidas en conducciones de agua importada desde el Río de la Plata) sobre la distribución de niveles freáticos y piezométricos. En particular, se analiza el problema de napas elevadas del Conurbano Sur. Se cierra el Informe con una serie de Conclusiones (capítulo 5) consideradas útiles para la gestión del recurso subterráneo.

2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

2.1 Software

Se utilizó el software Mike SHE, del DHI¹. Se trata de un modelo hidrológico determinístico, totalmente distribuido y de base física (Refsgaard and Storm, 1995). El mismo se deriva del modelo *Système Hydrologique Européen* o SHE (Abbot et al., 1986), cuyo desarrollo se inició en el año 1976 como una colaboración entre el Instituto Británico de Hidrología, el Instituto Danés de Hidráulica (DHI) y la consultora francesa SOGREAH, con financiamiento de la Comisión Europea de Comunidades.

SHE es capaz de simular toda la fase terrestre del ciclo hidrológico, o cualquier fracción de la misma (Figura 2.1.1). El modelo fue construido con una arquitectura modular, de modo que distintos módulos resuelven los distintos componentes del ciclo hidrológico. En particular, para representar el escurrimiento superficial concentrado (cursos de agua) utiliza el software Mike 11². El intercambio de datos entre módulos, así como la coordinación de la ejecución simultánea de los mismos, que pueden tener incluso pasos de tiempo independientes, es coordinado por un proceso central.

En definitiva, una vez caracterizado el sistema y especificados los forzantes (precipitación y evapotranspiración potencial), el modelo provee como resultados el flujo superficial (escorrentía, caudales y niveles de cursos), el flujo a través de la zona vadosa (contenido de humedad) y el flujo de agua subterránea (altura piezométrica y velocidad).

¹ <http://www.dhigroup.com/Software/WaterResources/MIKESHE.aspx>

² <http://www.dhigroup.com/Software/WaterResources/MIKE11.aspx>

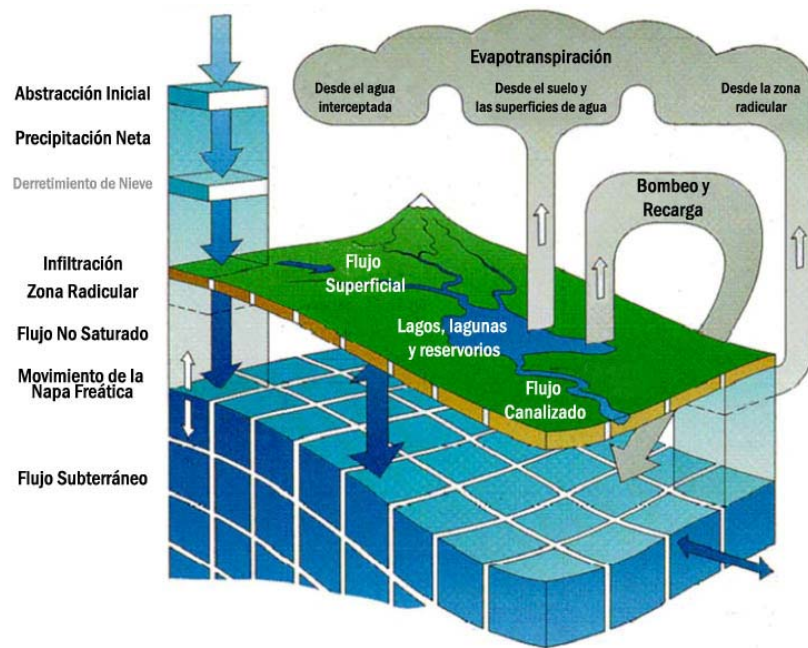


Figura 2.1.1. Representación Esquemática del Modelo MIKE SHE (Refsgaard and Storm, 1995)

2.2 Dominio

El modelo abarca, además de la cuenca completa del Matanza-Riachuelo, dos zonas costeras, una al Norte y otra al Sur de la desembocadura del Riachuelo en el Río de la Plata. En la Figura 2.2.1 se muestra el dominio utilizado en la Primera Etapa del estudio, de 2604 km² de área. La inclusión de estas zonas en el modelo resulta conveniente para especificar las condiciones de borde al flujo de agua subterránea en la zona costera (donde las isofreáticas tienden a ser paralelas a la línea de costa). Además, permite representar explícitamente las extracciones de agua del subsuelo que allí se realizan, las cuales han tenido un impacto significativo al menos en algunos momentos históricos.

A fin de reducir la influencia de las condiciones de borde impuestas sobre el borde NO superior del dominio, en la Segunda Etapa del estudio este fue extendido hasta el trazado del Río Reconquista (Figura 2.2.2), abarcando entonces un área de 2832 km².

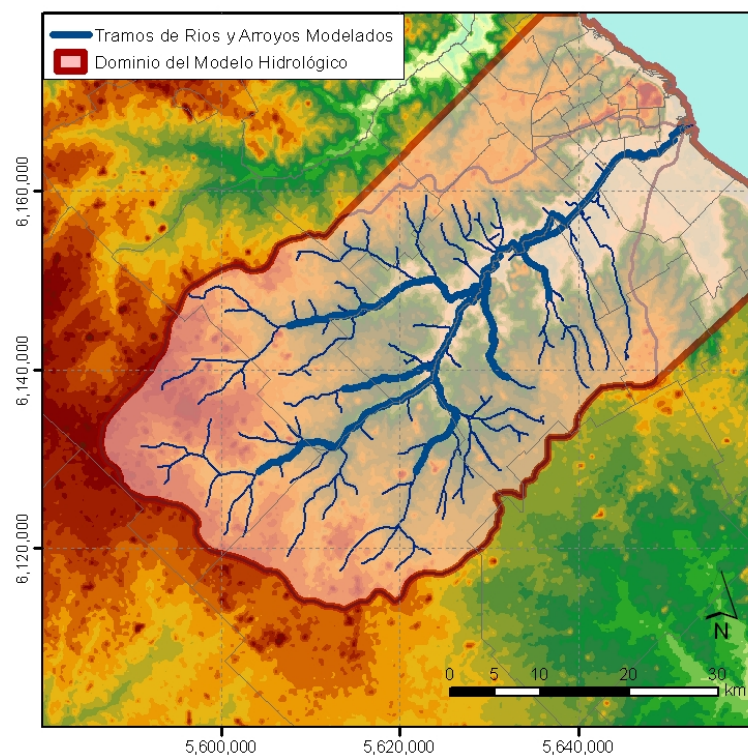


Figura 2.2.1. Dominio del modelo para la Primera Etapa.

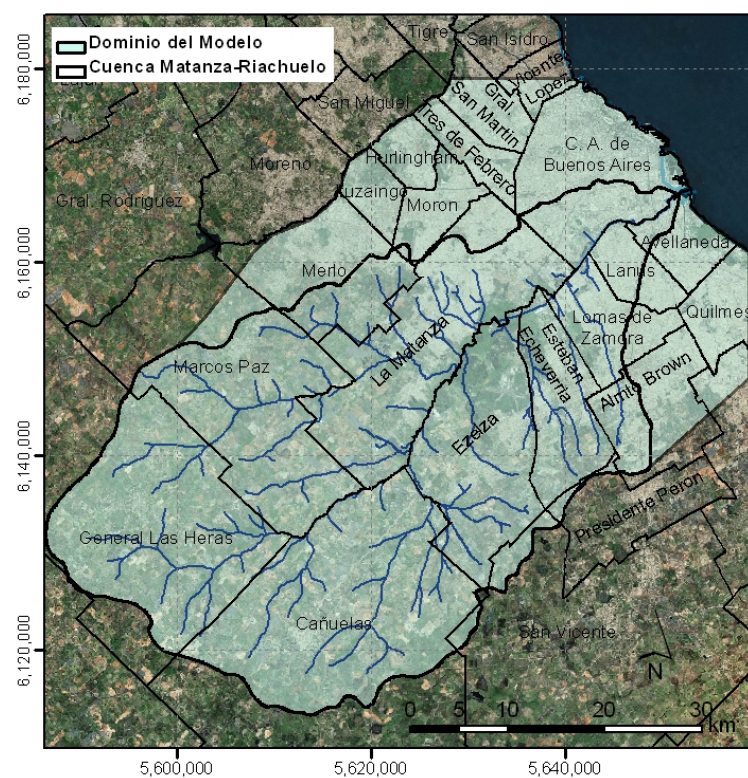


Figura 2.2.2. Dominio del modelo para la Segunda Etapa.

2.3 Modelo Digital de Elevación del Terreno

La topografía de la cuenca se representó como un Modelo Digital de Elevación (MDE) del Terreno sobre una grilla regular.

En la Primera Etapa del estudio este se obtuvo a partir de los datos de la SRTM (Shuttle Radar Topography Mision)³, que tiene un paso de malla de 90 m, los cuales fueron filtrados, para extraer el 'ruido', y desplazados rigidamente para adaptarlos a las cotas de las curvas de nivel del IGM. El MDE resultante se muestra en la Figura 2.3.1.

Dado que a posteriori se verificó que este MDE presentaba errores significativos en las zonas urbanizadas, en la Segunda Etapa del estudio se lo construyó a partir de las curvas de nivel del IGM. Este se muestra en la Figura 2.3.2.

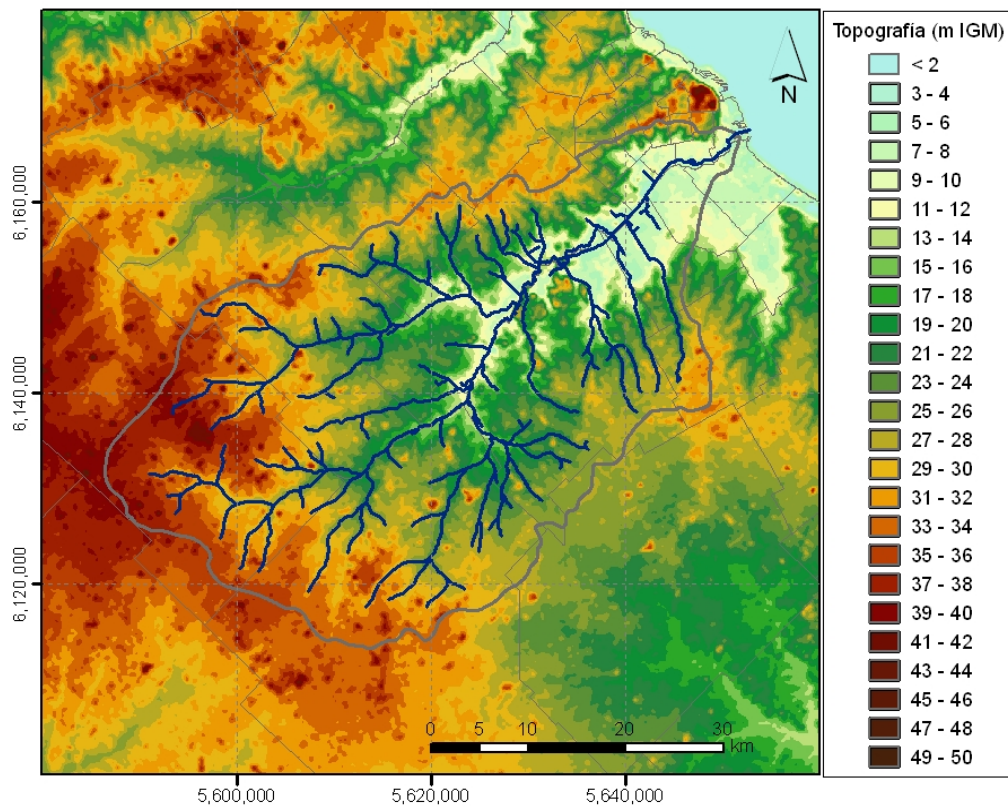


Figura 2.3.1. MDE para la Primera Etapa.

³ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

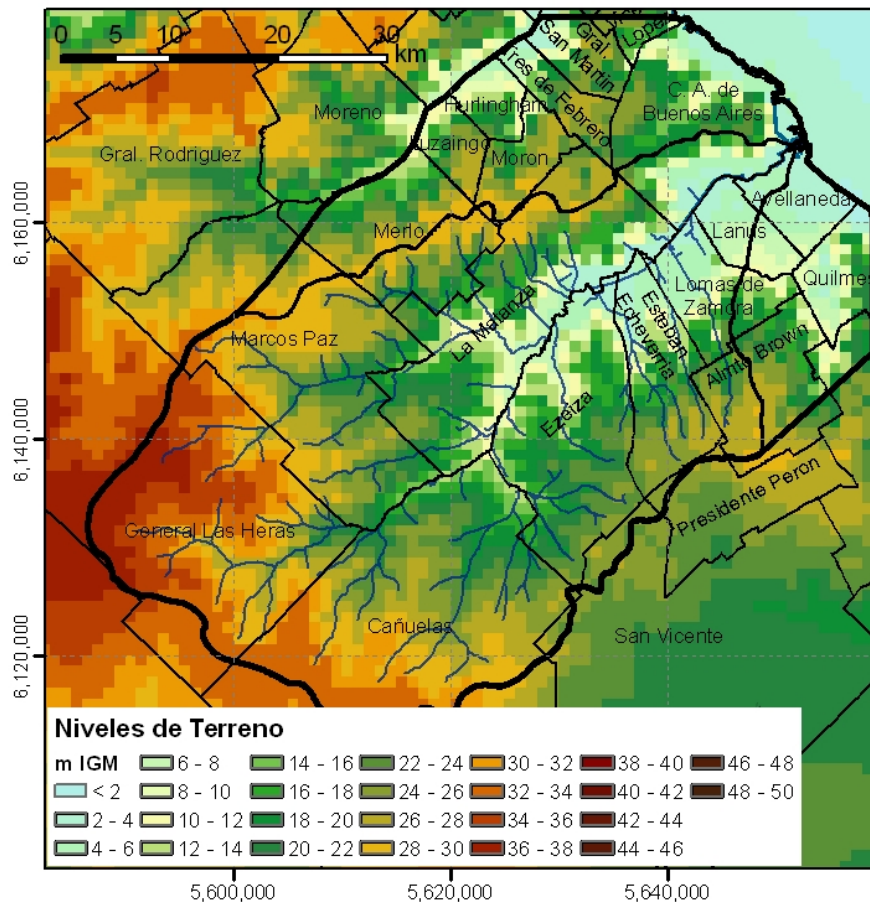


Figura 2.3.2. MDE para la Segunda Etapa.

2.4 Escorrentía superficial

El dominio de cálculo se discretizó en el plano horizontal mediante una grilla cuadrada de 1 km de lado, con lo cual resultaron del orden de 2600 celdas de cálculo para la Primera Etapa y 2832 para la Segunda.

A partir de los datos del MDE del SRTM se obtuvo, para cada celda, el volumen específico de almacenamiento en depresiones (Figura 2.4.1), asociado a la existencia de zonas de depresión del terreno en las cuales se acumula agua en superficie antes comenzar a escurrir cuenca abajo. A esta cantidad se le sumaron 8 mm, que es el valor estimado para las micro-irregularidades del terreno. Además, se determinó un valor representativo del nivel medio del terreno, calculado como la media del MDE ‘colmatado’ (es decir, aquél en el que se eliminan las depresiones) menos el almacenamiento específico (por unidad de área) en las depresiones.

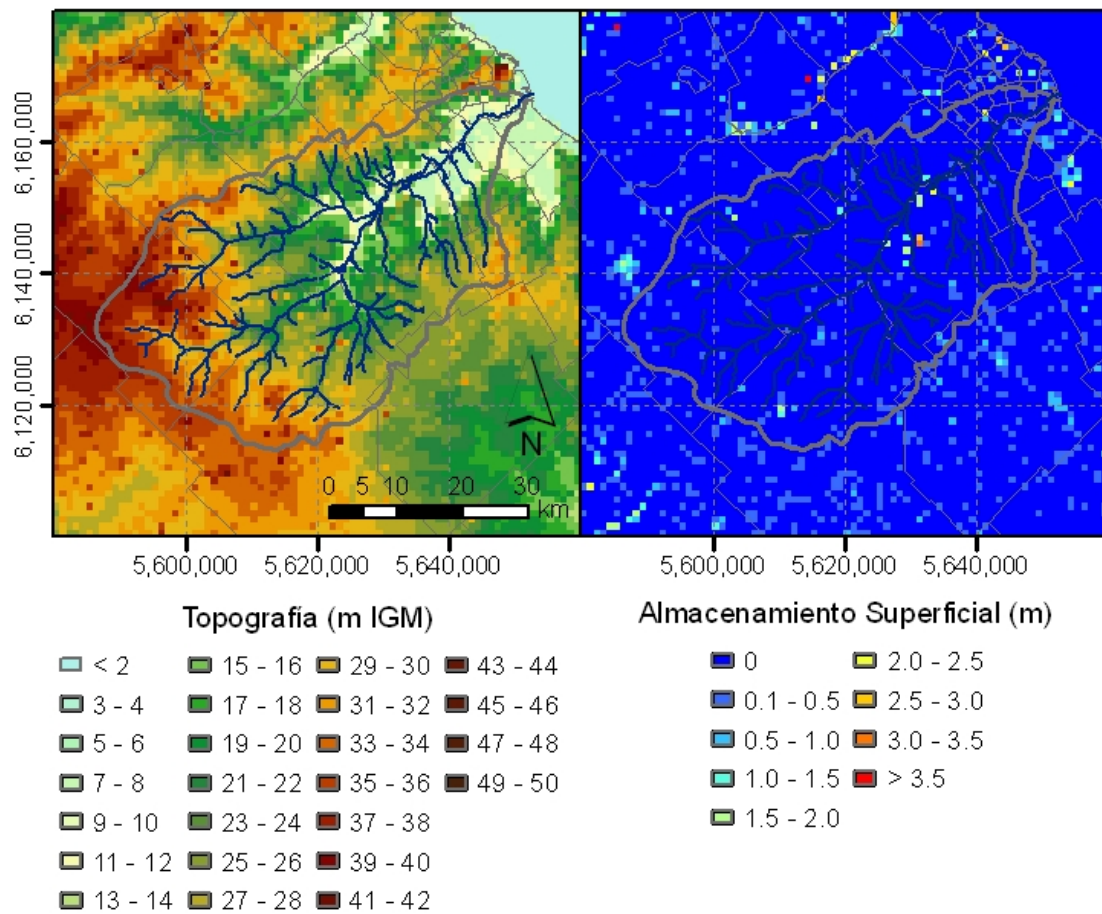


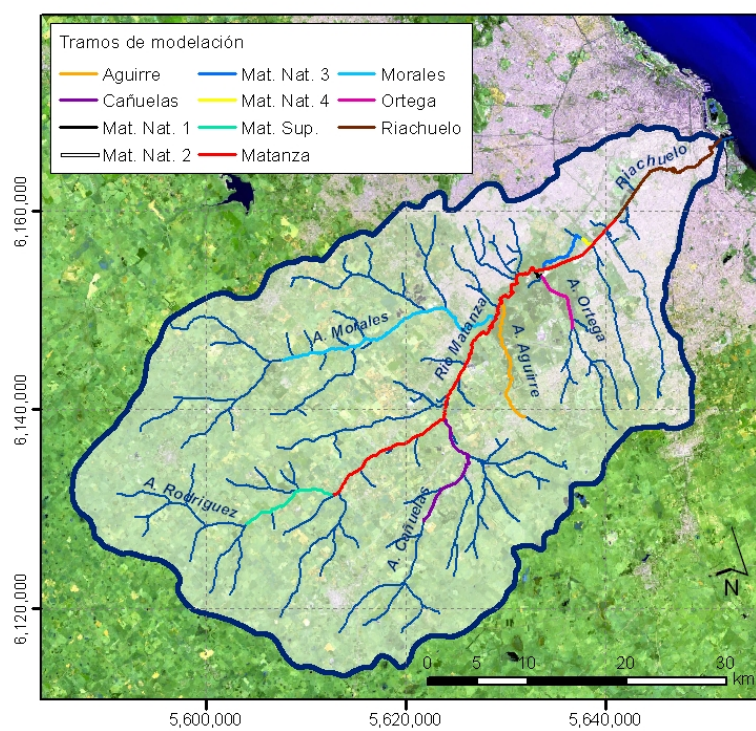
Figura 2.4.1. Almacenamiento en depresiones.

La rugosidad superficial se parametrizó con el coeficiente de Manning. Se le asignó un valor uniforme de 0,2, representativo de pasturas (Donigian et al. 1983).

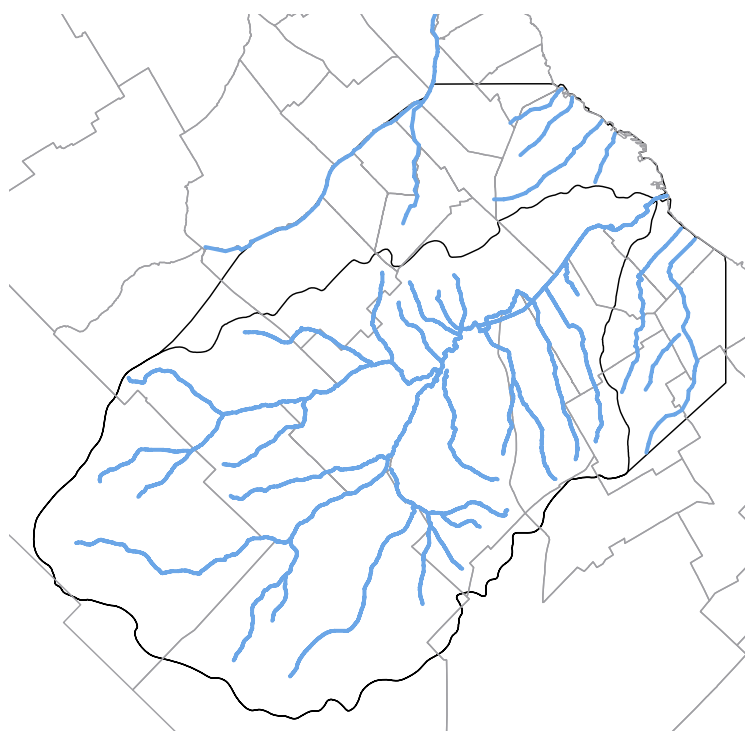
Se supuso un uso de suelo uniforme y constante en el tiempo para la zona rural, caracterizado por los siguientes parámetros: Índice de Área Foliar = 2, Profundidad Radicular Máxima = 400 mm, que son representativos de pasturas⁴.

En la Primera Etapa se representó sólo la red principal de cursos de agua, constituida por el río Matanza-Riachuelo y los arroyos Ortega, Aguirre, Morales, Cañuelas y Rodríguez, para los cuales se contaba con alguna información batimétrica. En la Segunda Etapa la red de drenaje natural fue extendida a la mayoría de los cursos que presentan un cauce desarrollado (Figura 2.4.2). Ante la falta de relevamientos batimétricos de los cursos de agua adicionales, estos fueron representados con una profundidad aproximada de entre 3 y 5 metros desde la cota del terreno (estimada a partir del MDT), dependiendo de la jerarquía del curso, y un ancho de fondo de 6 metros.

⁴ <http://ianrpubs.unl.edu/soil/g831.htm>



a) Primera Etapa



b) Segunda Etapa

Figura 2.4.2. Red de drenaje

La representación de la red de drenaje es importante para tener en cuenta su interacción con el agua subterránea, haciendo posible el cálculo del intercambio de agua entre los cursos de escurrimiento concentrado y el agua subterránea. Hay que tener en cuenta que el caudal de base es significativo en relación al balance de agua. Además, los cursos tienen una influencia local sobre los niveles freáticos.

2.5 Escurrimiento subterráneo

La discretización horizontal es la misma que para la esorrentía superficial (grilla cuadrada de paso de 1 km).

Para la zona no saturada se adoptó una representación con valores uniformes de los parámetros sobre toda la cuenca, asociada a suelos de tipo loess de la formación Pampeana. La Curva de Retención se representó mediante el modelo de Van Genuchten, con los siguientes valores de los parámetros, correspondientes a limos (Schaap & Leij 2000):

- Humedad de Saturación = 0,428
- Humedad Residual = 0,031
- Parámetros de Forma: $\alpha = 0,012$; $n = 1,377$

En cuanto a la Curva de Conductividad Hidráulica, se tomó el modelo de Averjanov, con los siguientes valores de los parámetros:

- Humedad de Saturación = 0,428 (Schaap & Leij 2000)
- Humedad Residual = 0,031 (Schaap & Leij 2000)
- Parámetro de forma: $n = 7$ (valor medio para limos⁵)
- Conductividad Saturada = 1,0 m/d⁶

La profundidad máxima de la potencial zona no saturada se estableció en 30 metros. Esta fue discretizada, desde la superficie hacia abajo, en 8 celdas de 0,05 m, 8 celdas de 0,2 m, 18 celdas de 1,0 m, y 5 celdas de 2,0 m.

En el caso de la zona saturada, se modelaron tres capas hidrogeológicas, de propiedades distintas (Figura 2.5.1). De la superficie hacia abajo, éstas son:

- Acuífero Pampeano + Freático (Formación Pampeana)
- Acuitardo de la Formación Puelche
- Acuífero de la Formación Puelche

Se despreció el intercambio de agua con la Formación Paraná, que yace debajo del Puelche (es decir, esta fue considerada como un acuícludo).

⁵ DHI, Mike She User Guide

⁶ Kruse, E., comunicación personal

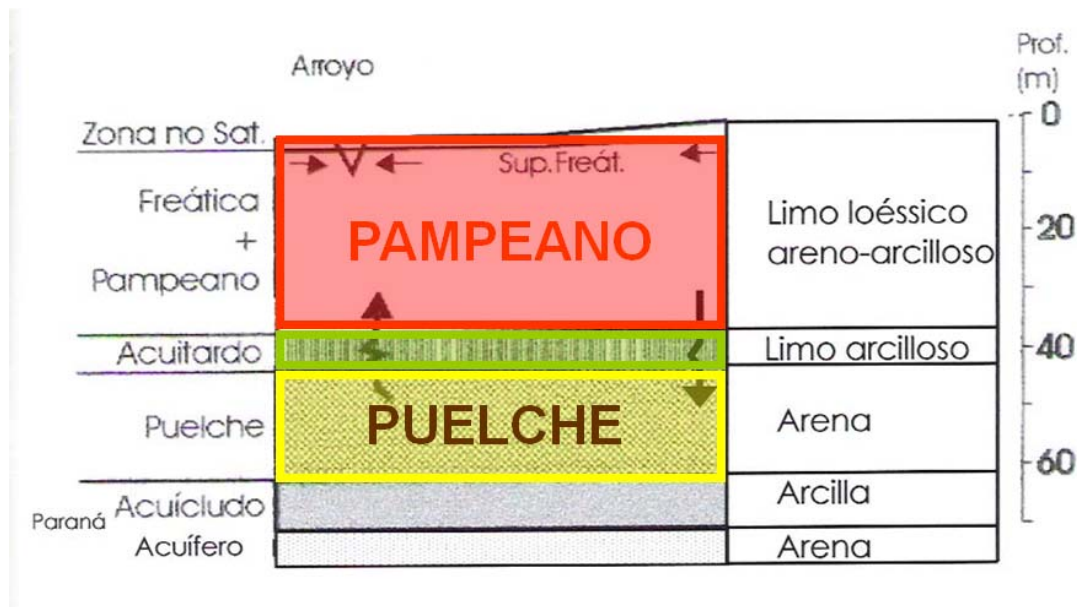


Figura 2.5.1. Capas hidrogeológicas (tomado de Meconi 2004).

La Formación Pampeana se extiende desde la superficie del terreno hasta el techo de la formación Puelche, excepto en el valle de inundación del Matanza-Riachuelo y en la cercanía de la costa del Río de la Plata, en que se encuentra cubierta o incluso está completamente reemplazada por sedimentos Pospampeanos. La influencia de estos sedimentos, de características bastante similares a los de la Formación Pampeana, fue despreciada en primera instancia.

Se fijaron los siguientes valores de los parámetros (Kruse, E., 2007), considerados uniformes:

- Conductividad vertical = 1 m/d
- Conductividad horizontal = 5 m/d
- Rendimiento Específico = 7,5%

El espesor que pueden alcanzar los sedimentos pampeanos varía entre 20 y 60 m, aproximadamente (Santa Cruz & Silva Busso 2002). El techo de la Formación Puelche (que es el piso del Pampeano), fue obtenido a partir de la compatibilización de curvas de nivel dentro de la cuenca⁷ y curvas digitalizadas de la zona urbana costera (Kruse 2007), tal como se muestra en la Figura 2.5.2.

⁷ Kruse, E., comunicación personal

El acuitardo de la Formación Puelche está constituido por materiales limo-arcillosos. Se asumió un espesor uniforme de 5 metros⁸. Se tomaron los siguientes valores de los parámetros:

- Conductividad vertical = Conductividad horizontal = 0,005 m/d⁹
- Coeficiente de Almacenamiento = 10^{-5} 1/m (Bear & Verrujit 1987).

Para el acuífero Puelche se tomaron los siguientes valores de los parámetros (Kruse 2007):

- Conductividad vertical = 2 m/d
- Conductividad horizontal = 20 m/d
- Coeficiente de Almacenamiento = $4.8 \cdot 10^{-6}$ 1/m¹⁰.

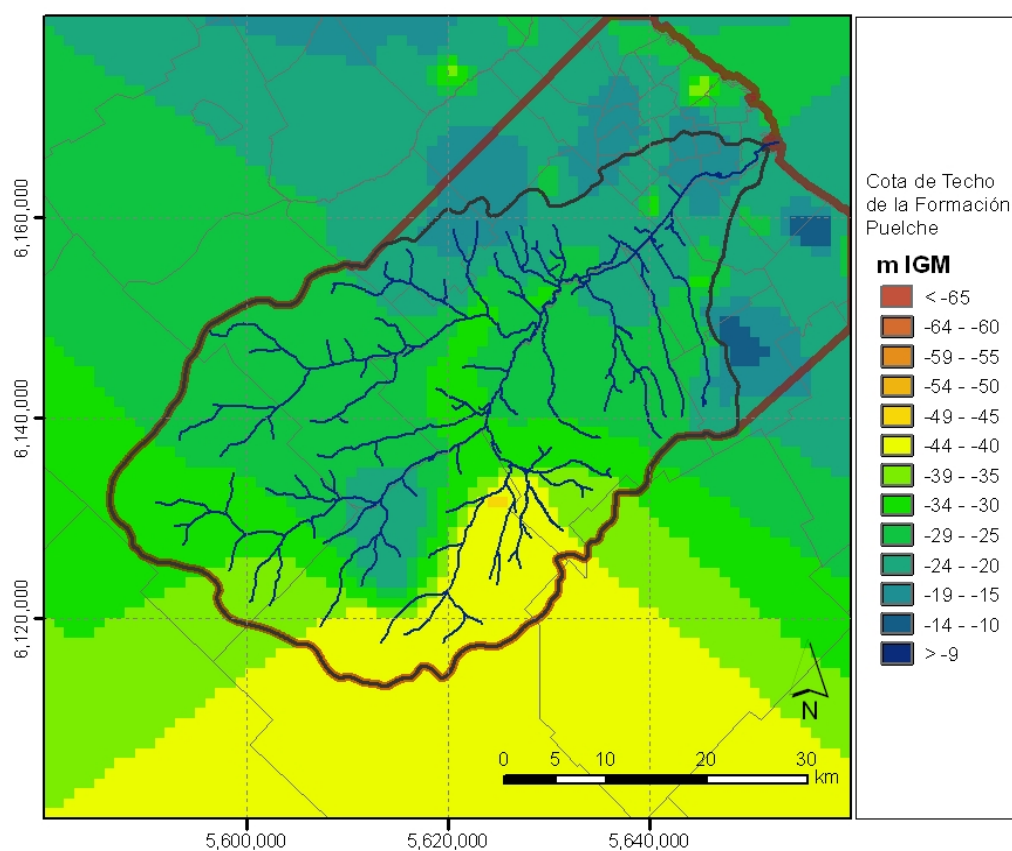


Figura 2.5.2. Techo de la Formación Puelche.

⁸ Kruse, E., comunicación personal

⁹ Kruse, E., comunicación personal

¹⁰ Calculado a partir del valor dado por Kruse, dividido por un espesor medio del acuífero.

El piso del Puelche se muestra en la Figura 2.5.3. Este fue obtenido compatibilizando curvas de nivel dentro de la cuenca¹¹ y datos de nivel en la franja costera (Amato & Silva Busso 2006).

Como condiciones de borde para el flujo de agua subterránea, se consideró impermeable todo el perímetro del modelo, excepto en:

- La zona costera, donde se implementó una condición de borde de nivel uniforme y constante igual a 0,25 m IGM, correspondiente al nivel medio del Río de la Plata.
- En parte del borde SE superior (partido de Almirante Brown), donde se producen ingresos de agua debido al efecto de las extracciones de AySA desde el Puelche. A fin de permitir este ingreso, se fijó en ese tramo una condición de borde de gradiente constante, en lugar de la de gradiente nulo; se tomó un valor de 0,2‰, con el que se logró un empalme suave con el cono de depresión.

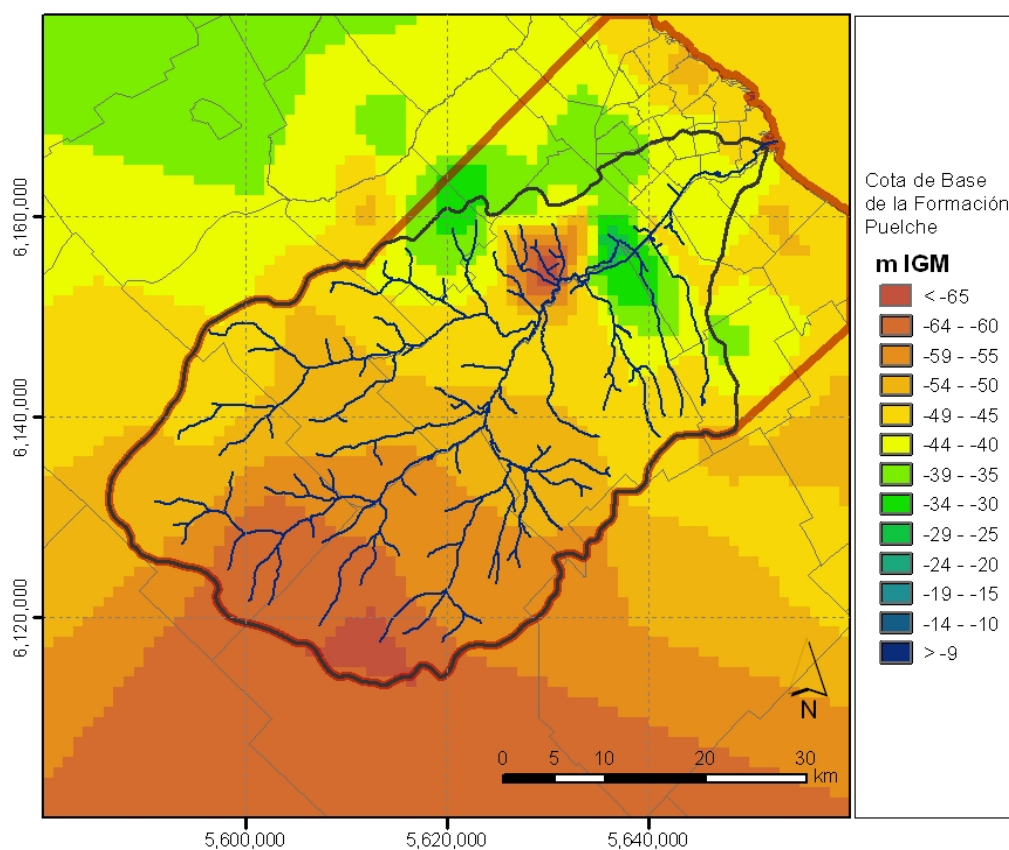


Figura 2.5.3. Piso de la Formación Puelche.

¹¹ Kruse, E., comunicación personal

2.6 Intercambio antrópico

Los intercambios antrópicos son la extracción de agua por bombeo y el aporte a través de pozos negros y pérdidas en conducciones.

Se partió de la siguiente zonificación (Herrero & Fernández 2008) (Figura 2.6.1):

- *Zona 1:* Abastecida de agua potable por el sistema central de AySA. Mayoritariamente con cobertura de cloacas.
- *Zona 2:* Abastecida de agua potable por el sistema central de AySA. Mayoritariamente sin cobertura de cloacas.
- *Zona 3:* Abastecida de agua potable por extracciones de agua subterránea. Mayoritariamente con cobertura de cloacas.
- *Zona 4:* Abastecida de agua potable por extracciones de agua subterránea. Mayoritariamente sin cobertura de cloacas.

Se dispuso de datos de porcentaje de población servida de agua potable y de cloacas en cada radio censal de acuerdo al censo de 2001, para todos los partidos en la zona de estudio. Por adición de los datos correspondientes a cada radio censal se determinó, para cada una de las zonas de cada partido, la población servida de agua potable y la población servida de cloacas.

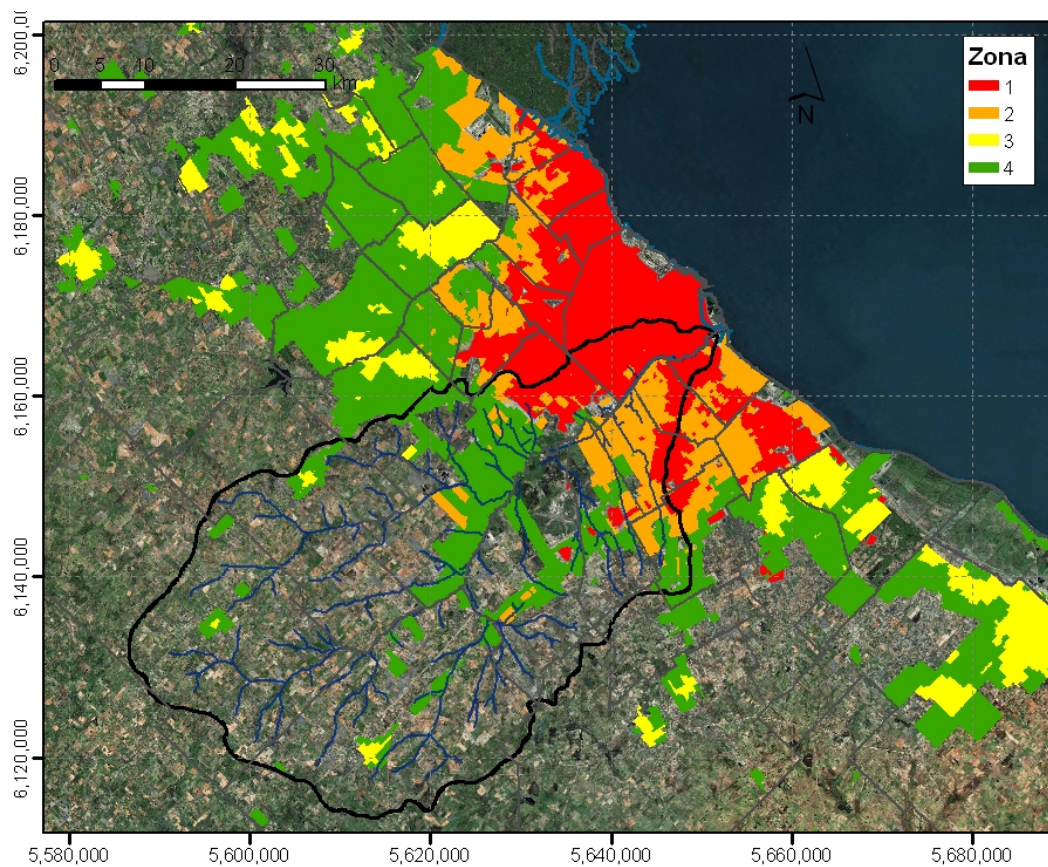


Figura 2.6.1. Zonificación por cobertura de agua y cloacas.

2.6.1 Pérdidas en redes de distribución de agua potable

Se dispuso de información provista por AySA¹² sobre dotación por habitante y por día, discriminada por Partido, para el período marzo a diciembre de 2006 sobre toda su Zona de Concesión. En base a una fracción de pérdida del 30% en promedio, se estimaron las pérdidas en la red de distribución. Para los partidos fuera de la Zona de Concesión, los datos fueron completados por proximidad y por características socioeconómicas semejantes.

Utilizando los datos de población por radio censal, se calcularon los caudales de pérdida por día para las zonas 1 y 2, que constituyen un aporte al acuífero Pampeano.

Del total de agua perdida en la red, se consideró que un 20% escurre hacia la superficie o bien es captada por los conductos pluviales o cloacales, de manera que solo el 80% del agua perdida llega efectivamente a la napa freática. Los valores fueron ajustados para el período 1960-2011 en base a los censos de población.

2.6.2 Filtración de pozos negros domiciliarios

La filtración desde los pozos negros domiciliarios fue estimada, por Partido, con el submodelo de cargas difusas domiciliarias desarrollado para modelar la carga contaminante del Matanza-Riachuelo (Menéndez 2008). En la Tabla 2.6.1 se indican los caudales de filtración por Partido, que constituyen aportes al acuífero Pampeano. Estos fueron implementados como extracciones puntuales por sobre la zona con pozos negros.

Tabla 2.6.1. Caudales de filtración desde pozos negros.

Partido	Caudal (m³/s)
Almirante Brown	0,33
Avellaneda	0,18
Cañuelas	0,08
Capital Federal	0,05
Esteban Echeverría	0,73
Ezeiza	0,36
Gral las Heras	0,03
Lanus	0,64
La Matanza	1,81
Lomas de Zamora	0,86
Merlo	0,01
Marcos Paz	0,08
Presidente Perón	0,01
San Vicente	0,00
Total	5,18

¹² AySA, “Recomendaciones para el diseño de redes cloacales”.

Fue necesario estimar, a partir de la cantidad total de población servida por la red cloacal en cada zona de cada Partido, cuántas de ellas corresponden a las servidas por agua potable de red y cuantas a hogares autoabastecidos. El criterio utilizado consistió en priorizar el servicio de cloacas a la población servida con agua de red. Específicamente, se supuso que:

- Si la cantidad de población servida por cloacas es menor que la servida por agua potable, las cloacas sirven solamente esa parte de la población.
- Si, en cambio, la cantidad de población servida por cloacas es mayor que la servida por agua potable, se supuso que toda la población con agua potable posee también cloacas; obviamente, el resto sirve a una fracción de la población autoabastecida.

Puede suponerse que la fracción de la población no servida por cloacas vierte sus efluentes a la napa freática a través de pozos negros o similares. Se adoptó una tasa de vuelco del 90% de la dotación que efectivamente llega a los hogares en cada zona de cada Partido. La cantidad de agua que llega a los hogares se determinó como la cantidad media producida por habitante, menos las pérdidas en la red.

Las tasas de producción por habitante utilizadas fueron de 400 l/hab/día, para los usuarios conectados a redes de agua potable subterránea, y de 250 l/hab/día, para los habitantes autoabastecidos. En el caso de los habitantes servidos por el sistema central de AySA, se utilizaron las tasas por partido informadas por la empresa (Tabla 2.6.2).

Los vuelcos a pozos negros estimados, en cada zona de cada Partido, se distribuyeron uniformemente sobre su superficie, y sus valores se ajustaron para el período 1960-2011 en base a los censos de población.

Tabla 2.6.2. Tasas de producción de agua por habitante servido por AySA.

Partido	Tasa (l/hab/día)
Ciudad A. de Buenos Aires	665
Tres de Febrero	565
Hurlingham	517
Morón	517
Ituzaingó	517
Avellaneda	765
Merlo	619
Lanús	571
Quilmes	626
Lomas de Zamora	476
Esteban Echeverría	438
Almte. Brown	326
Florencio Varela	619
General San Martín	468
Marcos Paz	619
La Matanza	420
Ezeiza	438

2.6.3 Extracciones de agua para uso doméstico

Zonas 1 y 2

En las zonas 1 y 2 el abastecimiento de agua potable se da mayormente a través de la red de AySA, que toma desde el Río de la Plata. Las extracciones de agua subterránea son realizadas principalmente por dicha concesionaria, las cuales son mezcladas con agua potable proveniente del Río de la Plata. También existen extracciones realizadas por la población no servida por la red, que se autoabastece a partir de perforaciones propias o comunitarias. Esta fracción de población no servida es menor al 20% en las zonas 1 y 2, con excepción de los Partidos de Ituzaingó y Ezeiza, en que alcanza el 32% y 56%, respectivamente.

En cuanto a la producción de agua potable de AySA, esta se estimó a partir de los datos de población servida en las zonas 1 y 2 y las tasas de producción por habitante. Las tasas utilizadas fueron informadas por la compañía para cada Partido (Tabla 2.6.2). Para los partidos no informados, dentro del radio de Concesión, se utilizó la tasa promedio de 619 l/hab/día. Estos datos de producción no se utilizan para estimar las extracciones de AySA, ya que para esto se cuenta con datos directos (ver más abajo), sino para estimar pérdidas en pozos negros (ver más abajo).

AySA cuenta actualmente con 231 pozos de extracción desde el acuífero Puelche, cuya ubicación se indica en la Figura 2.6.2. Se dispuso de datos de bombeo mensual para el año 2008. El caudal mensual total extraído del acuífero Puelche varía entre 2,1 y 2,6 m³/s. Todos ellos fueron implementados en el modelo (algunos están ubicados en las zonas 3 y 4).

En cuanto a las extracciones de la población no servida por la red, se estableció una tasa media de 250 l/hab/día realizada totalmente desde el acuífero Pampeano, ya que al ser pozos propios, se consideran de escasa envergadura. Dichas extracciones fueron distribuidas uniformemente entre las celdas del modelo correspondientes a las zonas 3 y 4 de cada Partido. Los valores estimados para el 2001 fueron ajustados para el período 1960-2011 a partir de la población total de cada partido según los sucesivos censos (1960, 1970, 1980, 1991, 2001), suponiendo que se mantienen las zonas servidas y las proporciones de población con servicios.

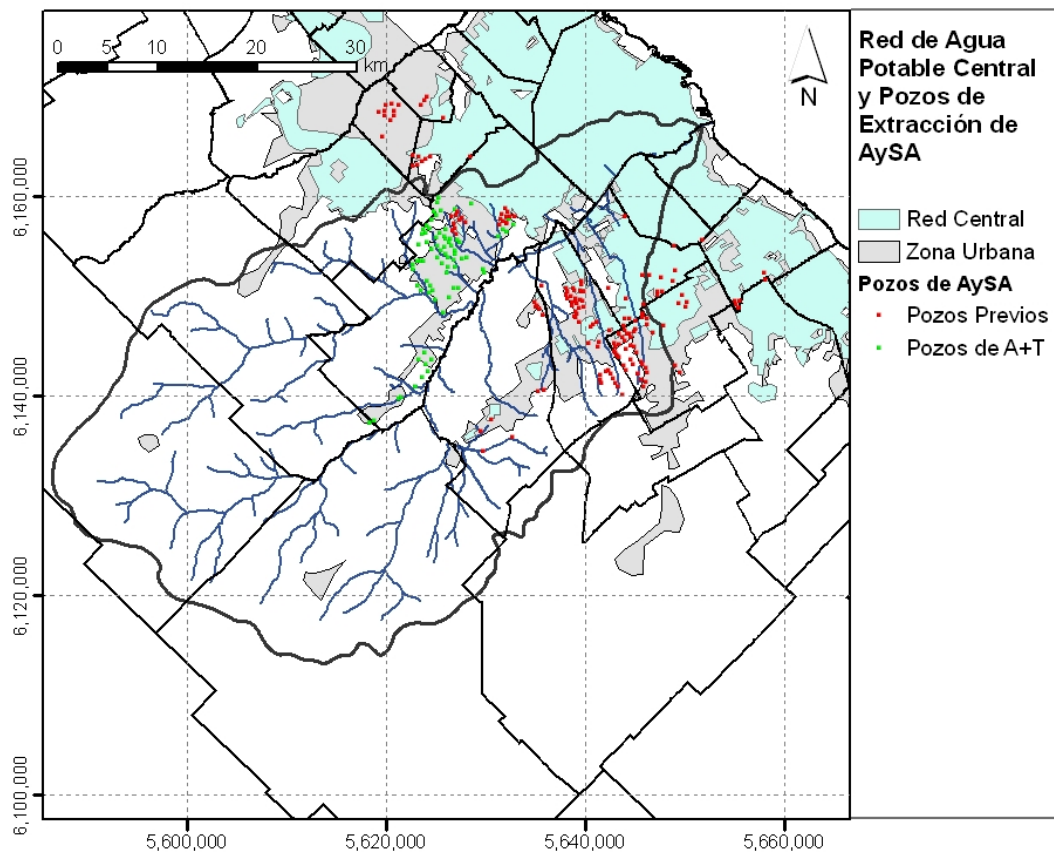


Figura 2.6.2. Ubicación de pozos de extracción de AySA.

Zonas 3 y 4

En las zonas 3 y 4, el abastecimiento de agua potable se da a través de redes de AySA u otras concesionarias, aunque existen en general porcentajes altos a muy altos de población no servida (llegando en algunos casos al 98%) que debe autoabastecerse a partir de pozos propios o comunitarios. Las extracciones de agua subterránea son realizadas tanto por las empresas concesionarias como por los particulares. Para la población servida por las redes se estimó una dotación media de 400 l/hab/día, que es extraída por las concesionarias. Para la población no servida se asumió una extracción media de 250 l/hab/día.

Se supuso que el 60% de las extracciones domésticas totales en estas zonas corresponden a agua del Pampeano y el restante 40% se extrae desde el Puelche. Dichas extracciones fueron distribuidas uniformemente en las zonas correspondientes, y ajustadas para el período 1960-2011 en base a los censos de población.

Las extracciones para suministro a red estimadas para AySA fueron excluidas del modelo, ya que están contempladas en las series pozo por pozo incorporadas directamente, tal como se explicó al describir las zonas 1 y 2.

A partir del 2005 se implementó el Plan Agua + Trabajo. En particular, 300.000 habitantes de la Zona 4 del Partido de La Matanza fueron incorporados a la red de agua potable, dejando por lo tanto de autoabastecerse. Dicha modificación fue tomada en cuenta en las estimaciones a partir de dicho año.

2.6.4 Extracciones de industrias

Se identificaron 12 grandes industrias en la cuenca alta, dentro de las cuencas de los arroyos Cañuelas y Chacón, cuyas extracciones fueron modeladas como sumideros puntuales. En las Tablas 2.6.3 y 2.6.4 se presentan las industrias consideradas, así como los caudales de extracción, que fueron tomados de las estimaciones de vuelcos realizadas para el modelo unidimensional de la cuenca del Matanza-Riachuelo (Menéndez 2008). Su ubicación se muestra en la Figura 2.6.3.

Tabla 2.5.2. Estimaciones de caudales extraídos por industrias de la zona del A° Cañuelas

Industria	Caudal total (m ³ /s)
COOP. TRABAJO OBRERA MAXIMO PAZ LDA	0,11
SINTEPLAST	0,10
QUIMICA Y ENERGIA SRL	0,10
INQUIMEC SRL	0,10
TRANSQUIM	0,10
CHEMOTECNICA S.A.	0,10
FRIGOCAÑUELAS	0,01

Tabla 2.5.3. Estimaciones de caudales extraídos por industrias de la zona del A° Chacón

Industria	Caudal total (m ³ /s)
GENELBA	0,30
SAF ARGENTINA S.A.	0,21
DAIMLER CHRYSLER	0,03
COTO CICSA	0,02
ROVAFARM ARGENTINA S.A.	0,02

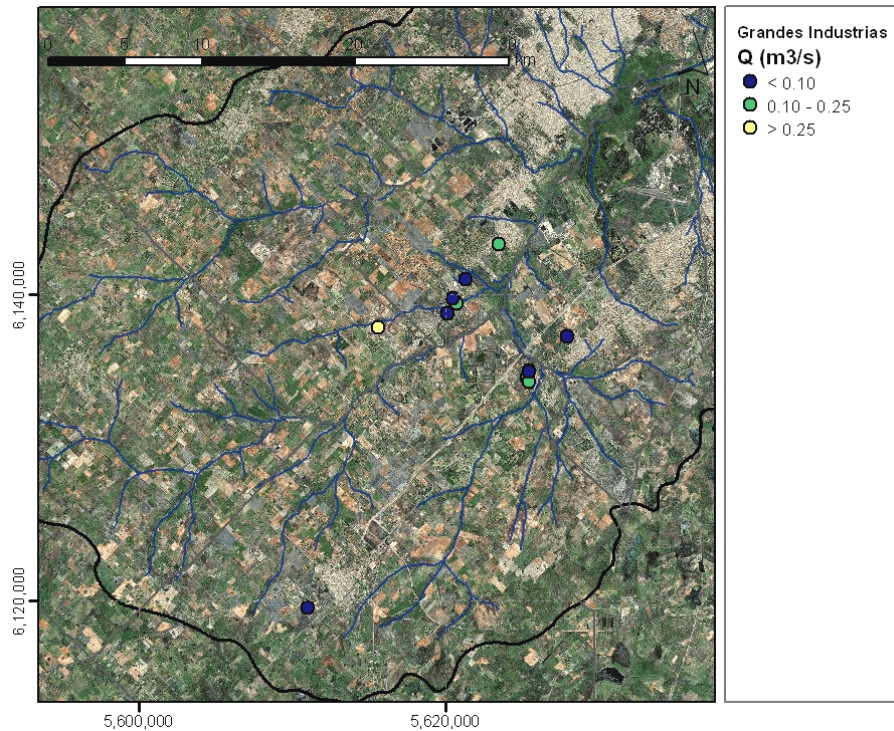


Figura 2.6.3. Grandes industrias modeladas puntualmente

Las restantes extracciones industriales fueron representadas también en forma individual, pero estimadas como cargas difusas. Los caudales utilizados son los generados para el modelo unidimensional del Matanza-Riachuelo (Menéndez 2008), es decir, los estimados a partir de la clasificación en categorías o rubros de las industrias registradas en la base de datos de la ACuMaR, y la utilización de factores de emisión. Estos caudales se consideran representativos del año 2008. Se asume que todas las industrias de la base de datos ubicadas en zona de concesión de AySA, con sistema de agua potable central, se abastecen mediante el mismo, no necesitando realizar extracciones.

Para las 351 industrias consideradas, resultaron extracciones de entre 0,6 y 62 m³/día, según la zona considerada. En la figura 2.6.4 se indica su ubicación.

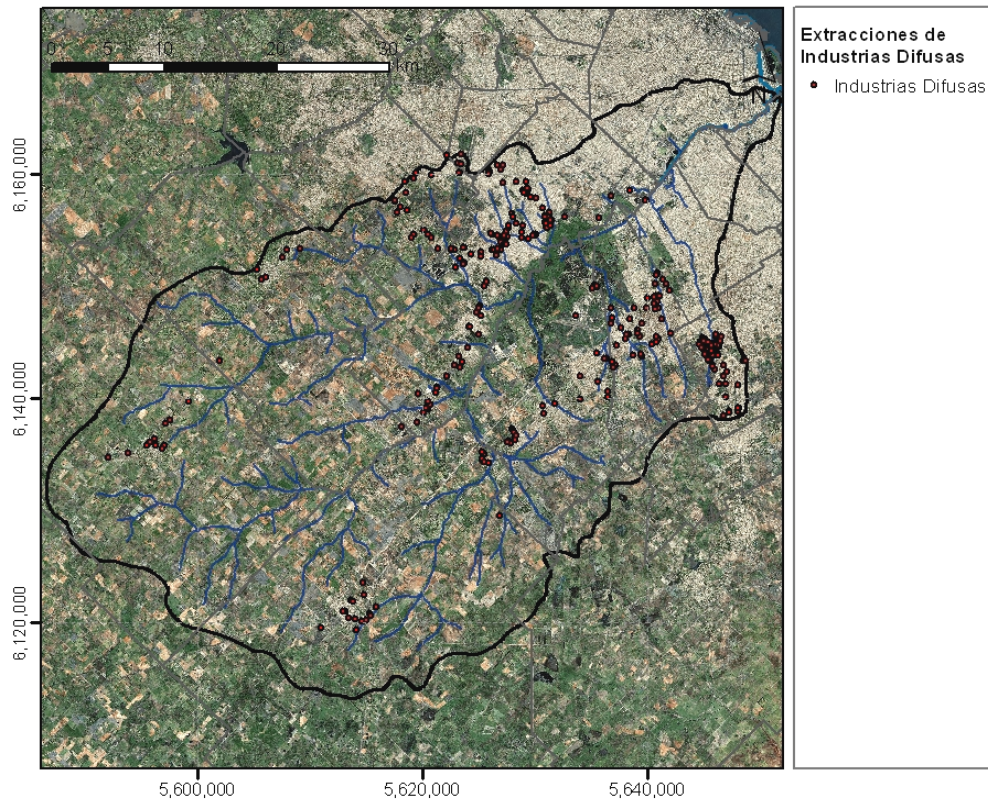


Figura 2.6.4. Extracciones de industrias difusas

Cabe destacarse que el caudal total de extracción estimado para estas industrias difusas es de solo $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa un valor muy bajo respecto del total de las extracciones para consumo doméstico (del orden de 200 veces mayor).

A fin de estimar la variación histórica de las extracciones de las pequeñas industrias, se indexaron linealmente los valores estimados para el año 2008 mediante el índice EMI (Estimador Mensual Industrial), confeccionado por el INDEC. La serie de caudal total de extracción resultante se presenta en la Figura 2.6.5.

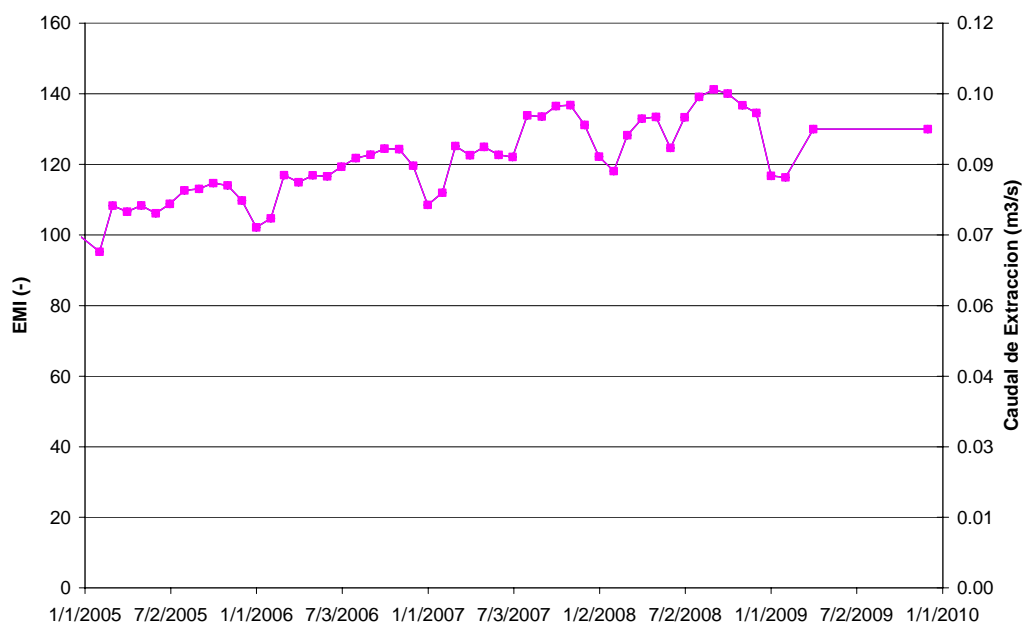


Figura 2.6.5. Serie de extracciones totales de industrias difusas

2.6.5 Extracciones de bombas depresoras

Se implementaron en el modelo las extracciones correspondientes a 320 bombas depresoras que, según artículos periodísticos¹³, están funcionando en la zona baja de Lanús desde enero/febrero de 2007.

Estas bombas se distribuyeron uniformemente en la zona baja, resultando en una bomba cada aproximadamente 200 m. El caudal de extracción se estimó en 1500 litros/hora por cada unidad, correspondiente a bombas de pequeña capacidad.

La introducción de estas extracciones mostró un efecto leve y local sobre los niveles freáticos.

2.6.6 Agregación de intercambios antrópicos

A modo de balance, en la Figura 2.6.6 se muestran los totales de los intercambios antrópicos de agua, por zona, para todos los Partidos que tienen una participación importante en el dominio del modelo (C.A.B.A., San Isidro, Vicente López, Tres de Febrero, Hurlingham, Morón, Ituzaingó, Avellaneda, Merlo, Lanús, Quilmes, Esteban Echeverría, Almirante Brown, Gral. San Martín, Marcos Paz, La Matanza, Ezeiza, Cañuelas y Gral. Las Heras). De las industrias sólo se incluyen aquellas ubicadas en las zonas 1 y 2 que están conectadas a AySA (ya que su acción no se puede discriminar a partir de los datos disponibles). Se observa que:

¹³ <http://www.politicadelsur.com.ar/0046/046lanus01.htm>

- El principal aporte proviene del Río de la Plata ($46,5 \text{ m}^3/\text{s}$), seguido de las extracciones desde el Pampeano ($5,0 \text{ m}^3/\text{s}$) y luego de las del Puelche ($3,3 \text{ m}^3/\text{s}$).
- El aporte desde plantas (con origen en el Río de la Plata o en el Puelche) alcanza $49,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Pero las pérdidas en las redes llegan a $11,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (24%).
- El vuelco a pozos negros es de $13,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

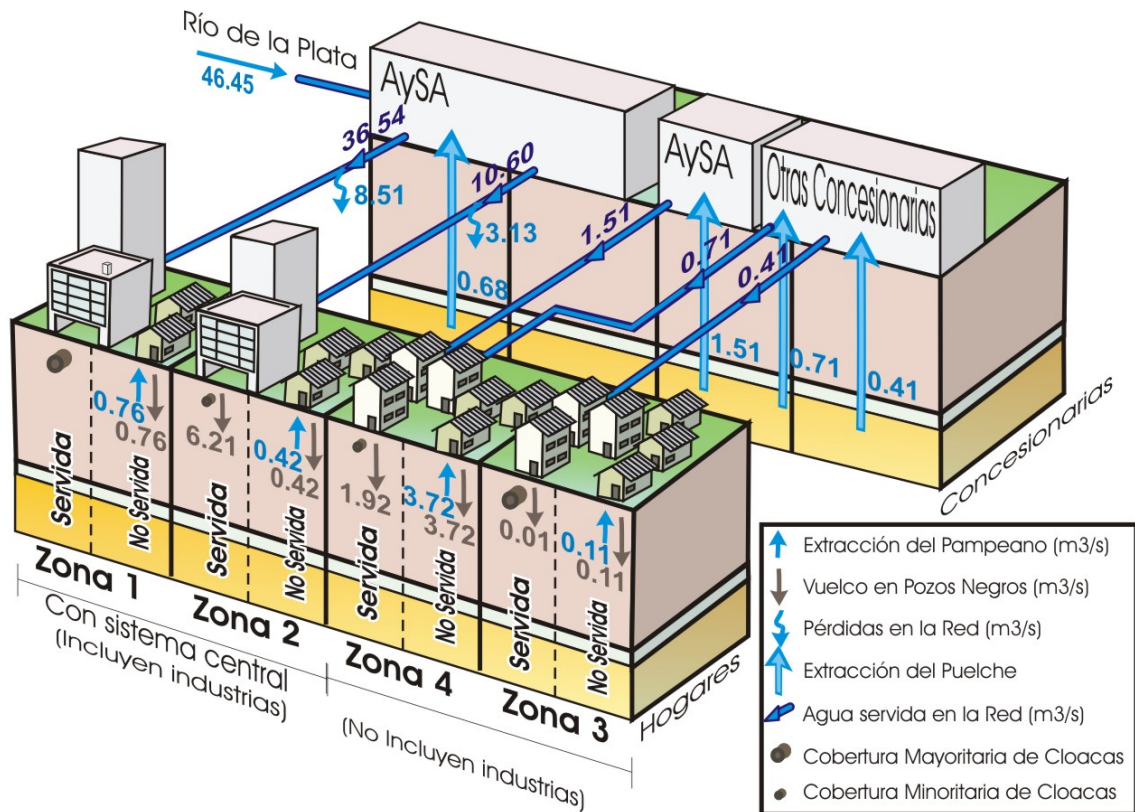


Figura 2.6.6. Intercambios antrópicos totales por zona (en m^3/s).

2.7 Impermeabilidad

Se realizó un análisis a fin de determinar el porcentaje de terreno en cada zona del dominio del modelo en que las precipitaciones son capturadas por sistemas pluviales y conducidas a cursos de agua cercanos antes de ser capaces de infiltrar a través de la zona no saturada. Este porcentaje es llamado porcentaje de impermeabilidad del terreno. Es importante notar que, a los fines del modelo hidrológico, el concepto de impermeabilidad es más complejo que el de una zona con una cobertura impermeable, ya que, de no existir un sistema pluvial apropiado, el agua de las precipitaciones que caen sobre esas zonas impermeables puede terminar llegando al terreno indirectamente.

La impermeabilidad de la cuenca se debe al asentamiento humano. El coeficiente de impermeabilidad se asignó, en cada zona, de acuerdo a las características de la urbanización predominante. Para determinar la calidad y extensión de las urbanizaciones se recurrió a datos elaborados por la SAyDS, referentes a la zonificación de los usos de suelo en la cuenca del Matanza Riachuelo. Los mapas disponibles distinguen la zona habitada de la cuenca en tres categorías:

- *Residencial-Comercial-Industrial*: Es la de mayor densidad. Abarca la totalidad de la CABA, Avellaneda, Lanús y parte de Lomas de Zamora y La Matanza.
- *Residencial*: De densidad poblacional intermedia.
- *Urbanizada*: Incluye las zonas de menor densidad poblacional, junto con las localidades del interior de la provincia de Buenos Aires (Cañuelas, Marcos Paz, General Las Heras, etc.).

Por fuera de la cuenca, el único dato disponible sobre uso de suelo es la extensión de la zona habitada. Estos datos se indican en la Figura 2.7.1.

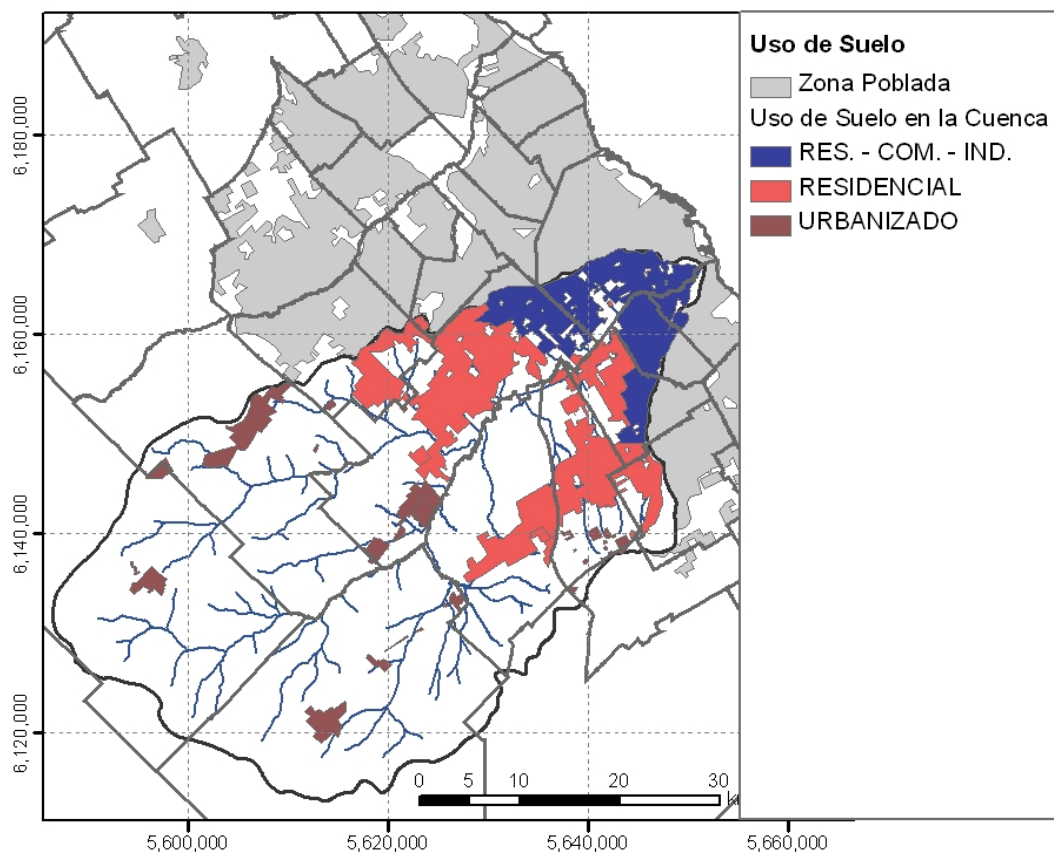


Figura 2.7.1. Zonas pobladas.

A fin de estimar la impermeabilidad de las tres zonas, se obtuvieron algunas imágenes satelitales representativas de cada una de ellas. Estas se muestran en la Figura 2.7.2.



CABA

Avellaneda

Lanús

a) Zona Residencial-Comercial-Industrial.



La Matanza

La Matanza

Esteban Echeverría

b) Zona Residencial



CABA

Avellaneda

Lanús

c) Zona Urbanizada

Figura 2.7.2. Imágenes representativas de las distintas categorías de urbanización.

Para la zona Residencial-Comercial-Industrial, las imágenes muestran una cobertura urbana prácticamente completa, calles totalmente pavimentadas, con algunos espacios verdes correspondientes a pulmones de manzanas y plazas. Se supone que el agua precipitada sobre superficies cubiertas es colectada en su totalidad por sistemas pluviales. Se estimó el porcentaje de superficies verdes en aproximadamente el 10%. El coeficiente de impermeabilidad adoptado, es, en consecuencia, de 0,90.

Para la zona Residencial se observa una mezcla de calles asfaltadas y de tierra. Se supone la existencia de conducciones pluviales y/o cordones-cuneta en calles pavimentadas, y cunetas en calles de tierras. El sistema pluvial descrito se considera capaz de conducir a cursos de agua una proporción importante de las precipitaciones sobre superficies cubiertas. Las superficies verdes abarcan alrededor del 40% del terreno. En función de estas consideraciones se adoptó un coeficiente de impermeabilidad de 0,50.

Para la zona Urbanizada se observa la ausencia de calles pavimentadas, con una baja densidad de población. Las superficies verdes abarcan una gran proporción. Se supone que el agua de las precipitaciones, incluida una gran parte de la que cae sobre zonas cubiertas, termina llegando indirectamente al terreno. La fracción conducida directamente desde superficies cubiertas a las cunetas es, probablemente, capaz de escurrir hasta los cursos de agua. Considerando una cobertura de alrededor del 20%, un 50% de las cuales estarían conectadas directamente a las cunetas, se adopta un porcentaje de impermeabilidad de 0,1.

Para las zonas exteriores a la cuenca se adoptó un valor de impermeabilidad similar al de la zona Residencial-Comercial-Industrial en el caso de las zonas urbanas de la CABA, Avellaneda y Lanús. Para el resto de la zona poblada del gran Buenos Aires se adoptó un valor similar al de la zona Residencial.

Para las zonas rurales, dentro y fuera de la cuenca, se fijó un valor nulo de impermeabilidad.

La Figura 2.7.3 muestra la zonificación así alcanzada para el coeficiente de impermeabilidad.

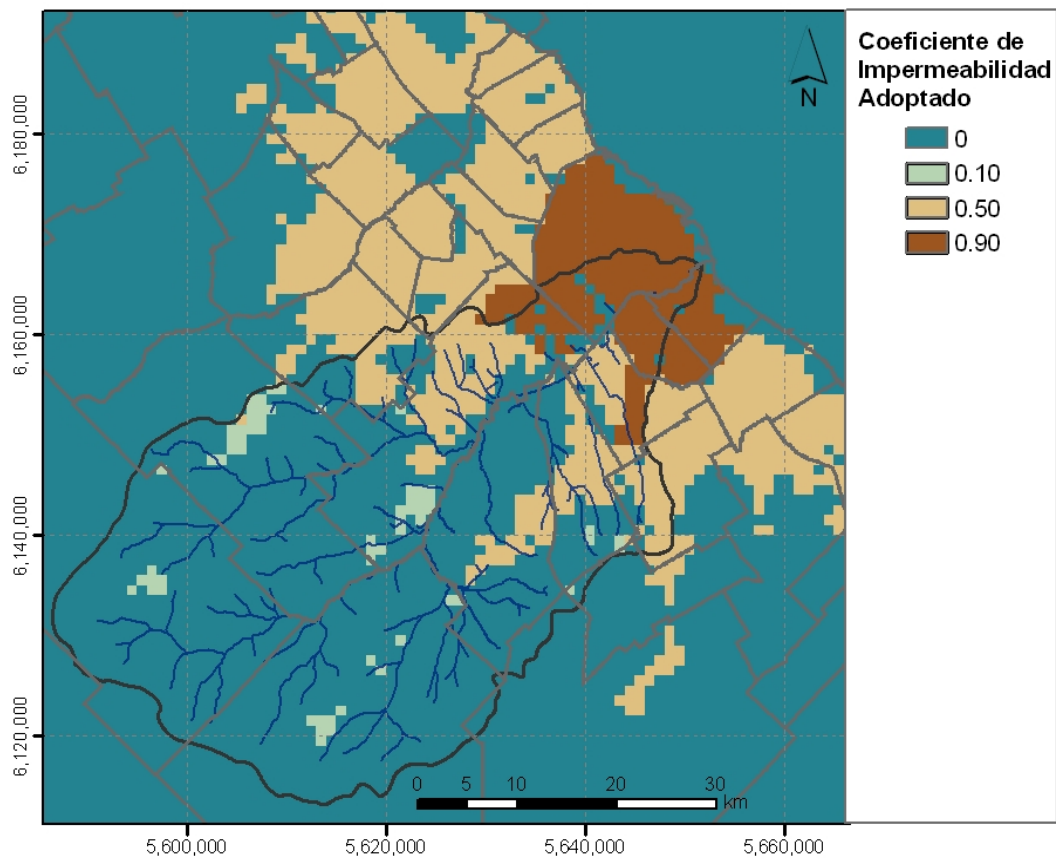


Figura 2.7.3. Zonificación del coeficiente de impermeabilidad.

Dado que el Mike SHE no incluye una forma directa de representar el efecto hidrológico de la impermeabilización producida por la existencia de zonas urbanas, se aplicaron correcciones a las series de precipitación y evapotranspiración. En los lugares que poseen superficies impermeables con sistemas pluviales, la precipitación que cae sobre las mismas es colectada y transportada al curso de agua más cercano. Se adoptó la hipótesis de que toda la precipitación ocurrida sobre zonas impermeables escurre al sistema de desagüe, mientras que el resto llega al suelo (permeable). La precipitación (PRE) efectiva, para cada zona, se calcula entonces como:

$$PRE_{efectiva} = \%_{Permeabilidad} \cdot PRE_{Total}$$

A su vez, la evapotranspiración (EVP) desde el suelo también se ve reducida debido a la existencia de superficies impermeables. En las zonas permeables ocurre evaporación directa y evapotranspiración debido a la vegetación desde las capas superiores de suelo. Esta extracción de agua disminuye el contenido de humedad en esas capas de suelo, lo que produce un aumento de la succión capilar, dando como resultado un flujo de agua ascendente desde capas más profundas. Debajo de superficies impermeables, en cambio, la evaporación desde el suelo y la evapotranspiración se ven impedidas. Por lo tanto:

$$EVP_{reducida} = \%_{Permeabilidad} \cdot EVP_{Potencial}$$

Existe la posibilidad de que, aunque no exista succión en la capa superior del suelo impermeabilizado que produzca ascenso de humedad, la succión que se genera en zonas vecinas induzca dicho flujo ascendente, sobre todo si las zonas permeables e impermeables se encuentran entremezcladas espacialmente. Entonces, la capacidad de evapotranspirar desde las zonas permeables podría ser mayor a la que normalmente se observaría desde una zona totalmente permeable. En ese caso se tendría que:

$$EVP_{reducida} = \left[\%_{Permeabilidad} + F \cdot (1 - \%_{Permeabilidad}) \right] \cdot EVP_{Potencial}$$

donde el valor del ‘coeficiente de evapotranspiración’ $F (> 0)$ debe ser ajustado durante la calibración.

Los volúmenes de agua que resultan de los aportes directos que ocurren en las zonas consideradas impermeables, donde actúa un sistema de desagües pluviales, son inyectados a los cursos de agua cercanos. Estos se calculan como la diferencia entre la precipitación total y la efectiva.

Las zonas impermeables se subdividieron en diferentes subcuencas de drenaje (Figura 2.7.4) para calcular los hidrogramas de aportes puntuales a los cursos.

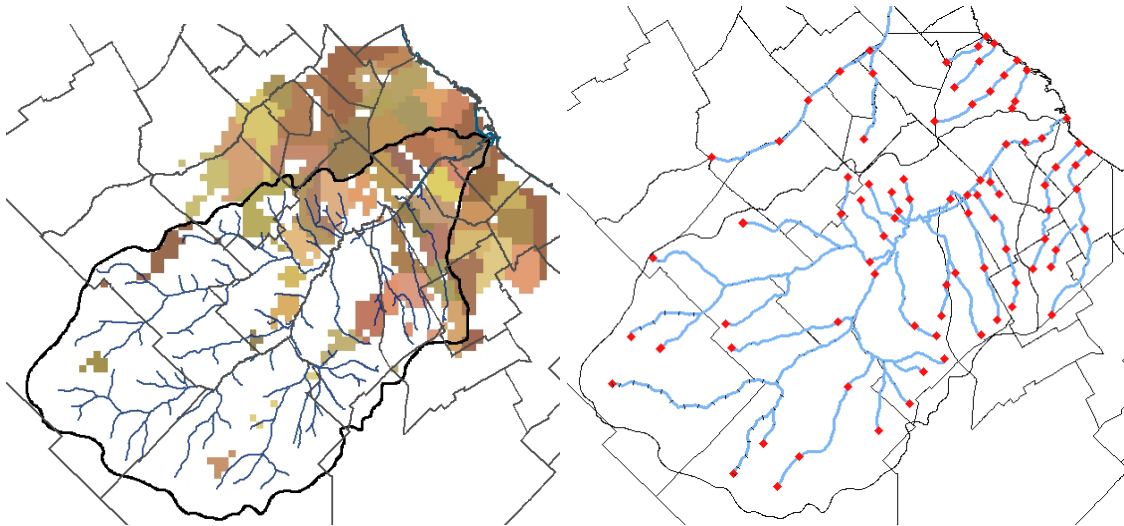


Figura 2.7.4. Subcuencas y ubicación de ingresos puntuales de caudales

Para tener en cuenta el almacenamiento característico de los sistemas de desagües pluviales, se implementó un modelo hidrológico simple de tránsito de crecientes. El modelo de embalse lineal surge de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dS}{dt} = I - Q$$

donde S es el almacenamiento, I el caudal de ingreso y Q el de egreso. El modelo de embalse lineal propone la siguiente relación entre el almacenamiento y el caudal saliente:

$$S = k \cdot Q$$

donde k es una constante de tiempo, del orden del tiempo de concentración de la cuenca de drenaje. La ecuación se resolvió por un método de diferencias finitas implícito, utilizando un valor del parámetro $k = 18$ hrs. A manera de ejemplo, en la Figura 2.7.5 se observa el efecto de laminación producido por el almacenamiento propuesto sobre el hidrograma de aporte al A° Morales.

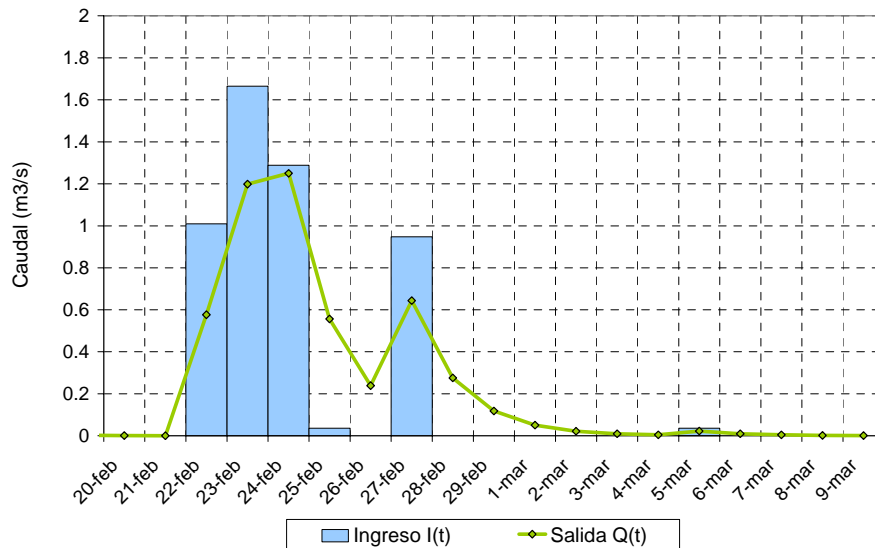


Figura 2.7.5. Ingreso al A° Morales

2.8 Forzantes

Tanto para las precipitaciones como para la evapotranspiración potencial se utilizaron los datos diarios tomados en las estaciones Buenos Aires (Villa Ortúzar) y Ezeiza (Figura 2.8.1). Se dispuso de series de precipitaciones diarias (Figura 2.8.2a). Para el cálculo de las series de evapotranspiración potencial media diaria se utilizó la fórmula de Penman-Monteith, utilizándose como datos la latitud, la heliofanía, las temperaturas máxima y mínima diarias y la humedad relativa media (Figura 2.8.2b). Las series de precipitación y evapotranspiración potencial se extendieron al dominio del modelo mediante polígonos de Thiessen.

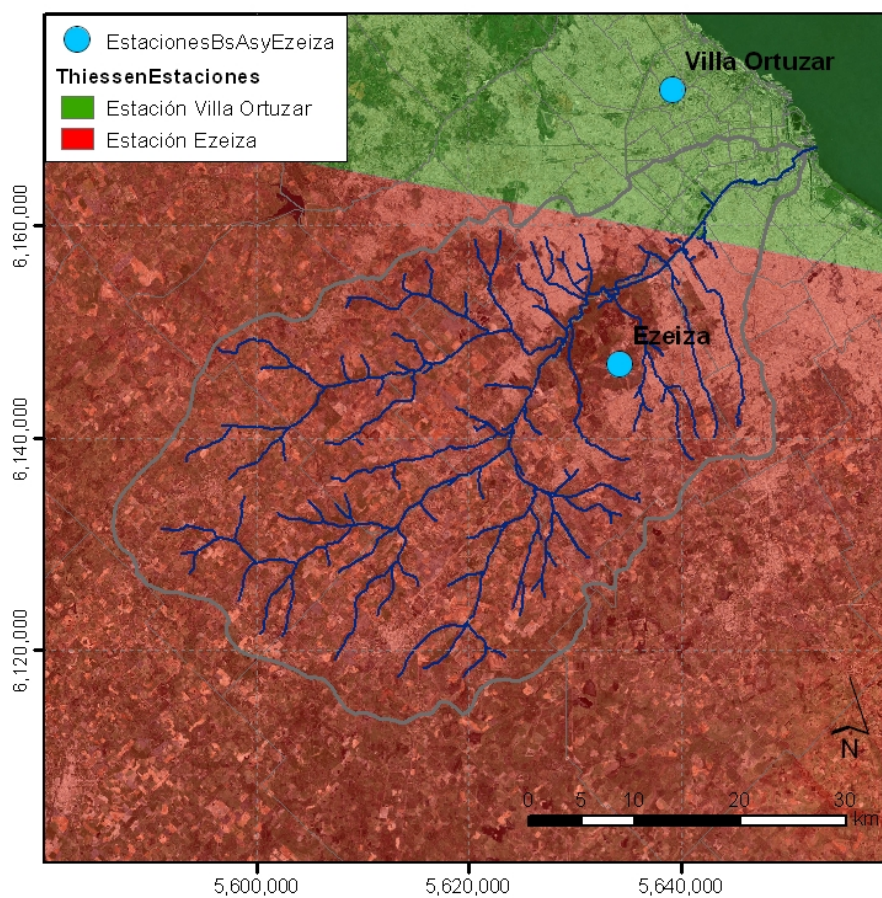
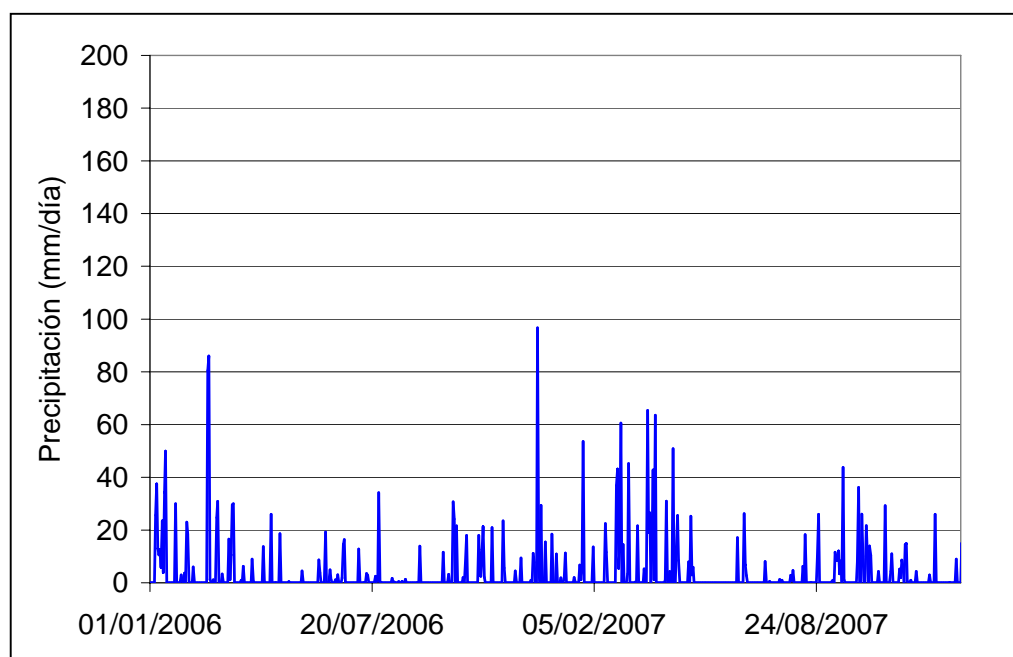
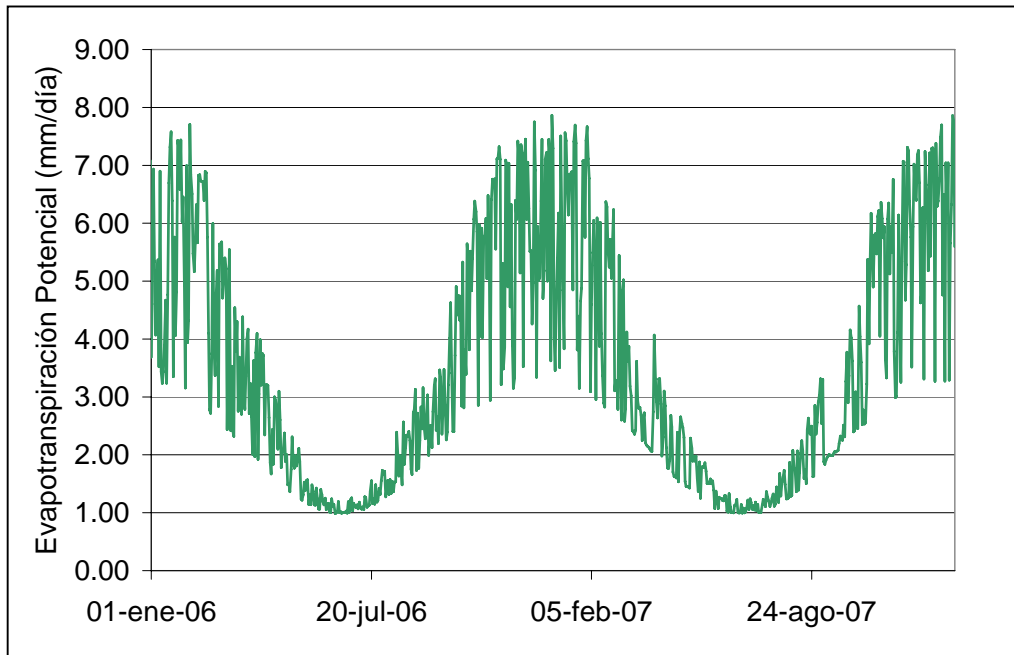


Figura 2.8.1. Ubicación de estaciones meteorológicas.



a) Precipitación



b) Evapotranspiración

Figura 2.8.2. Serie temporal de forzantes en la estación Villa Ortúzar.

3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

3.1 Validación

Se efectuó una validación del modelo comparando sus resultados con datos de mediciones. La idea de la validación es mostrar que el modelo provee resultados cuali-cuantitativamente aceptables, aún antes de comenzar con los ajustes para su calibración. Esta validación se llevó a cabo con el dominio de Primera Etapa, con la extensión limitada de la red de drenaje, considerando sólo extracciones industriales de los 3 mayores establecimientos, sin tener en cuenta la extracción de las bombas depresoras, y aún sin haber implementado la impermeabilización por el desarrollo urbano.

En primer lugar se efectuó una comparación entre, por un lado, los niveles freáticos y piezométricos medidos en la red de pozos de monitoreo de la ACuMaR (Figura 3.1.1) y los niveles freáticos de la red de AySA, y, por el otro, los niveles provistos por el modelo. La comparación corresponde al mes de febrero de 2009, y se muestra en la Figura 3.1.2. El acuerdo se considera muy satisfactorio a escala de cuenca.

Como complemento, se presentan distribuciones en cortes longitudinales y transversales. Los datos de mediciones de la red ACuMaR correspondientes a la semana que se extiende entre el 18 y el 26 de noviembre de 2008 fueron comparados con resultados del modelo para el día 25 de noviembre. Hay que tener en cuenta que la variación semanal de los niveles pueden ser del orden de los 30 centímetros. Se efectuaron cortes longitudinales al Matanza-Riachuelo siguiendo los pozos de monitoreo, tal como se indica en la Figura 3.1.3. La Figura 3.1.4 muestra las comparaciones a lo largo de esos cortes. Teniendo en cuenta la complejidad del sistema, el acuerdo general se considera satisfactorio, y especialmente bueno para el corte YY, es decir, a lo largo de la transecta sudeste. Adicionalmente, se llevaron a cabo cortes transversales al Matanza-Riachuelo, pasando por los pozos de monitoreo (Figura 3.1.5). Los resultados se presentan en la Figura 3.1.6, indicando un acuerdo más consistente en la cuenca media y alta, donde justamente los efectos de impermeabilización son pequeños.

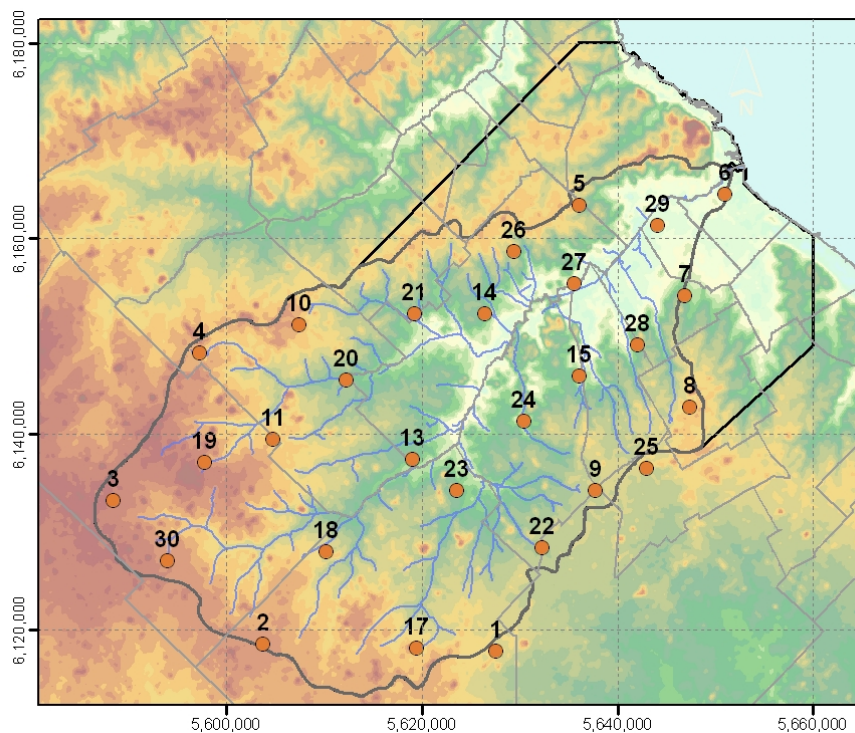
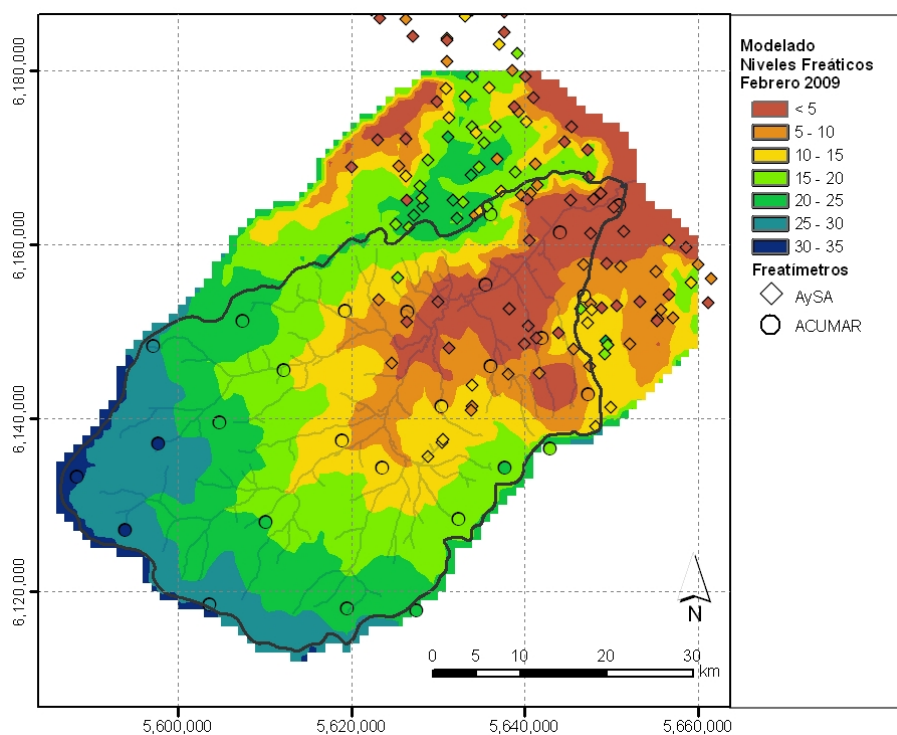
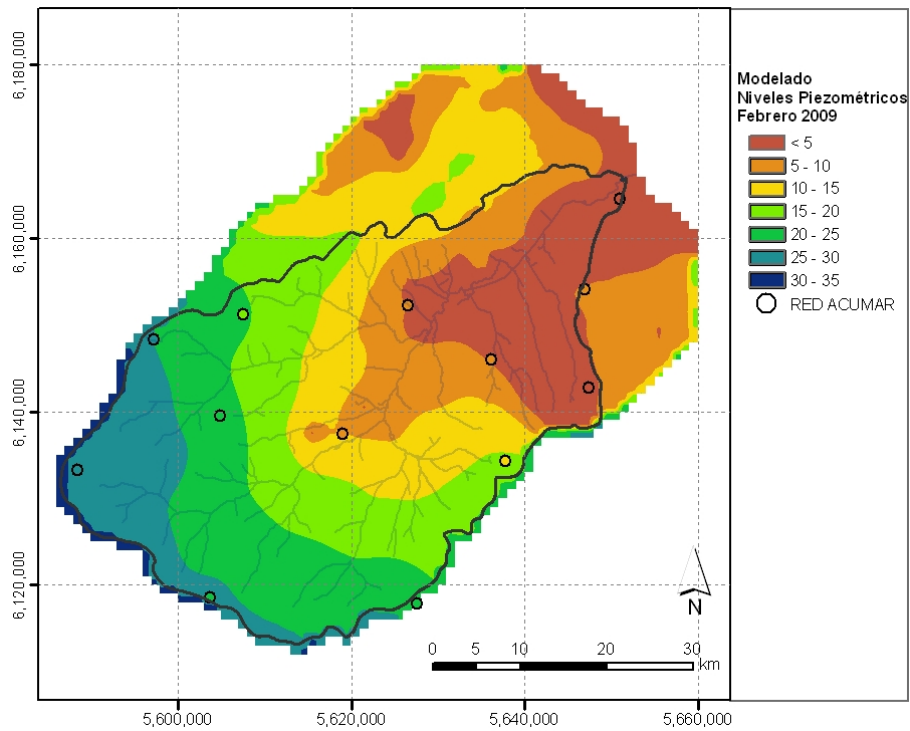


Figura 3.1.1. Ubicación de la red de pozos de monitoreo de la ACuMaR.



a) Nivel freático



b) Nivel piezométrico

Figura 3.1.2. Comparación de distribuciones en planta de niveles freático y piezométrico para febrero de 2009.

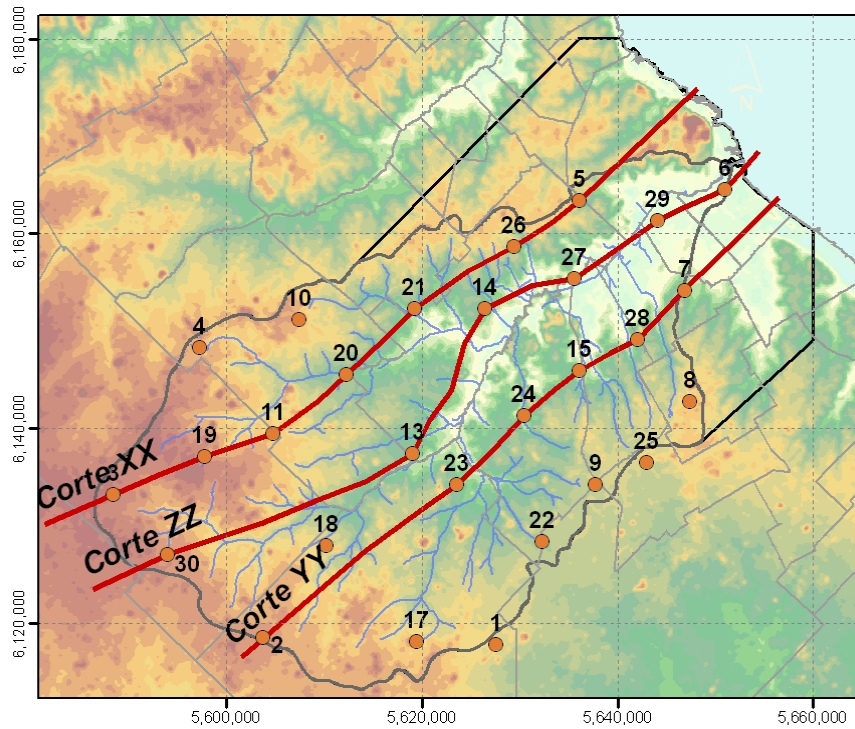
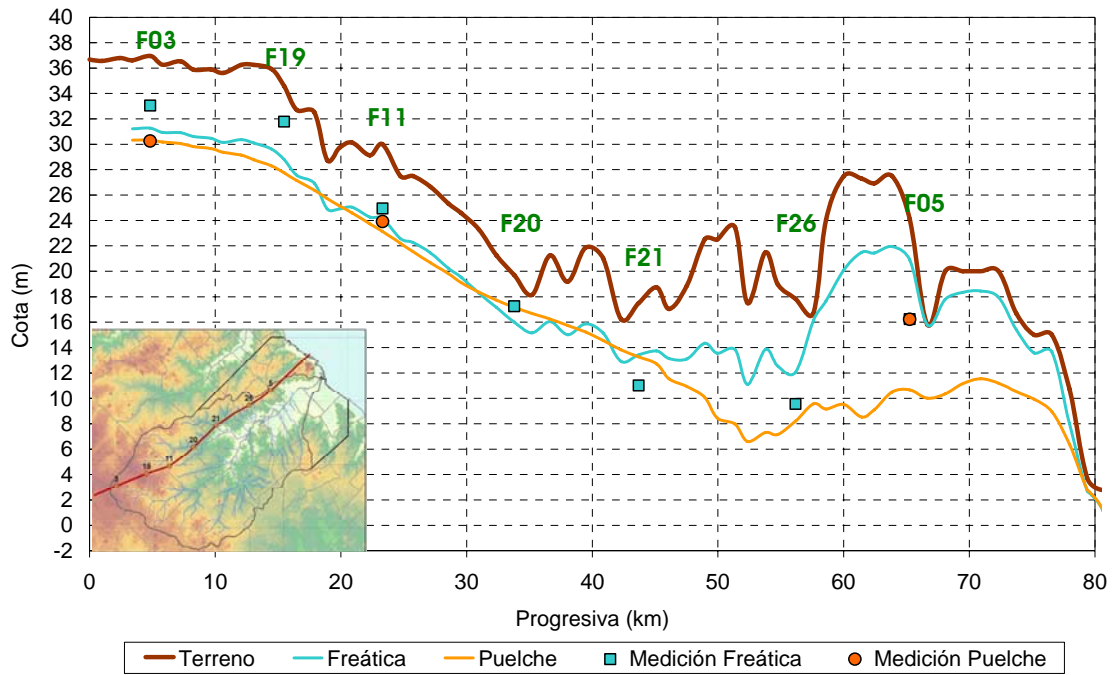
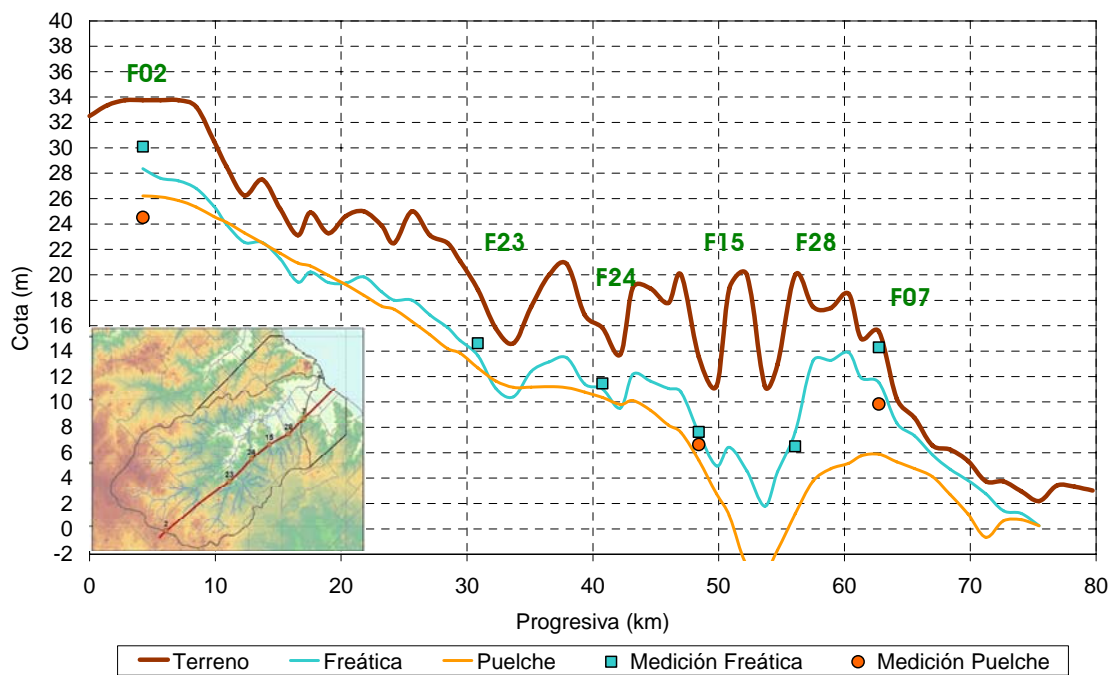


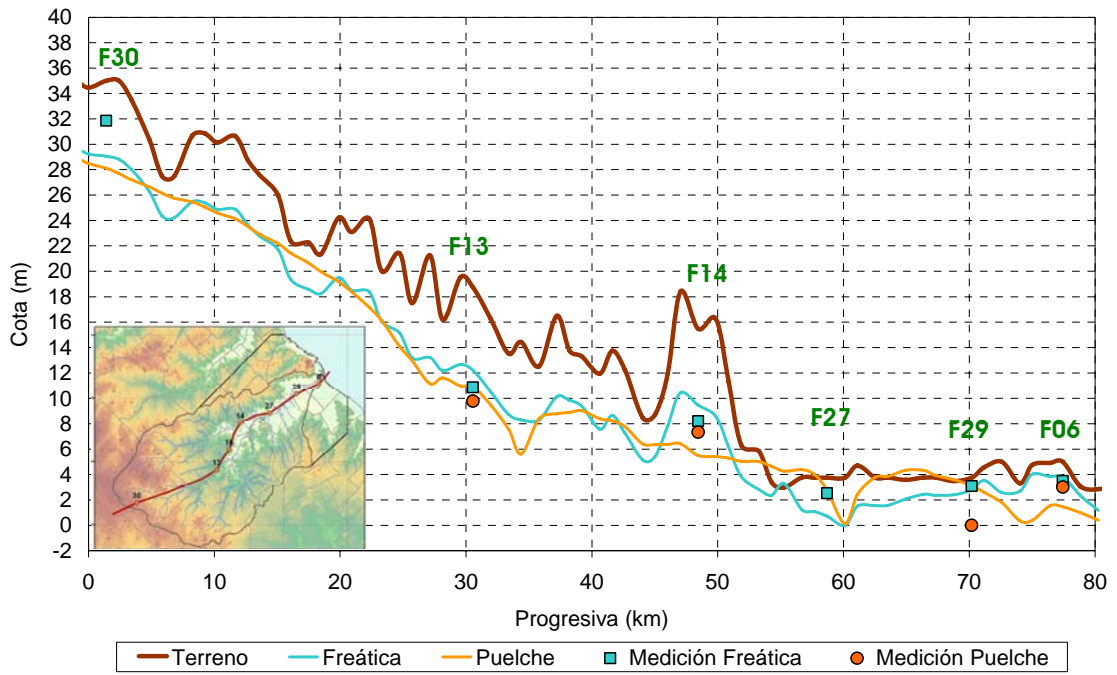
Figura 3.1.3. Cortes longitudinales siguiendo los pozos de monitoreo de la ACuMaR.



a) Corte XX



b) Corte YY



c) Corte ZZ

Figura 3.1.4. Comparación de distribuciones longitudinales de niveles freático y piezométrico para noviembre de 2008.

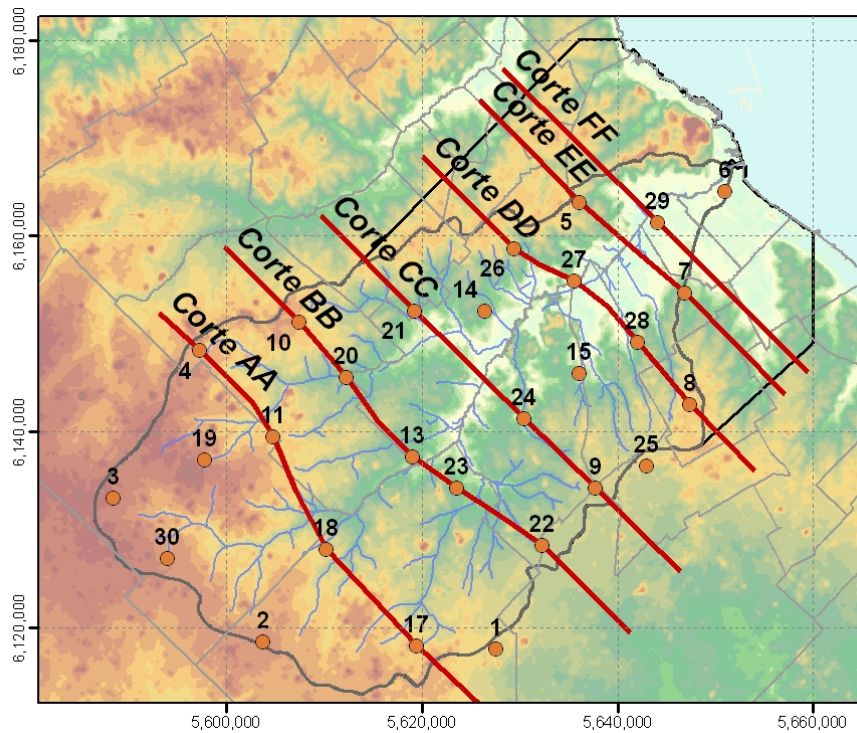
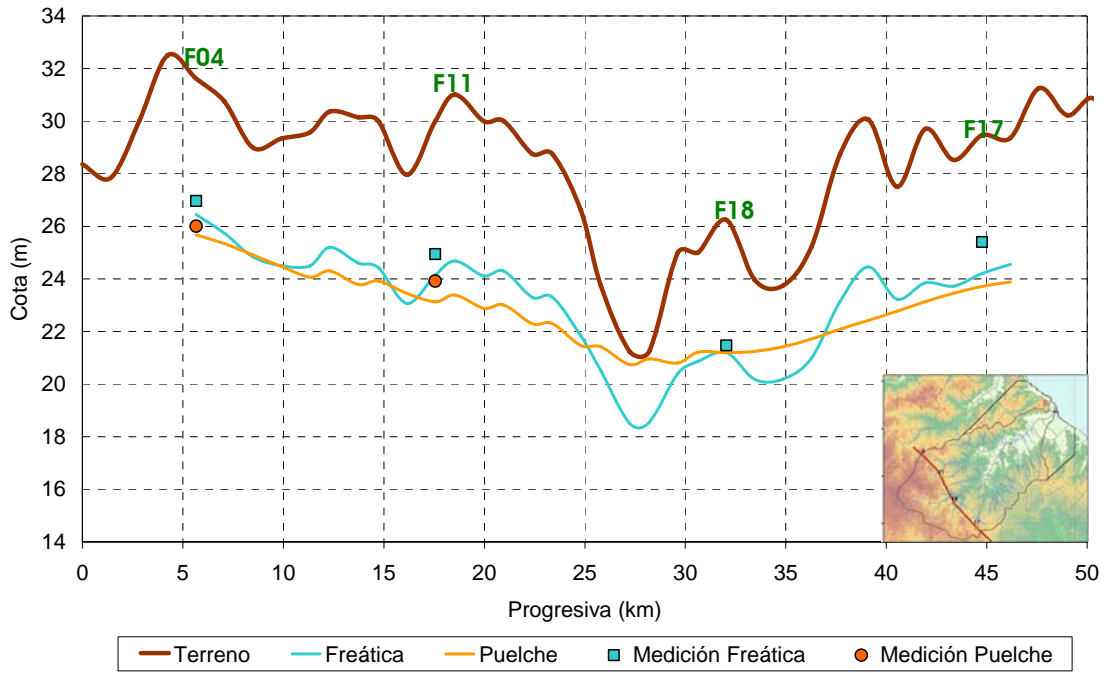
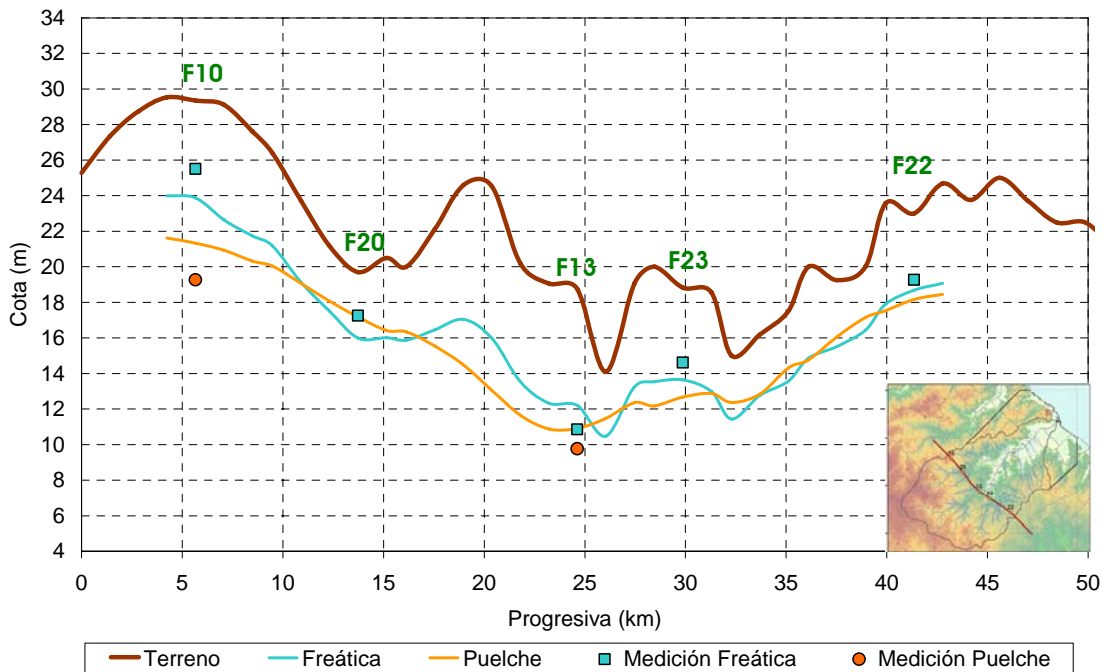


Figura 3.1.5. Cortes transversales siguiendo los pozos de monitoreo de la ACuMaR.



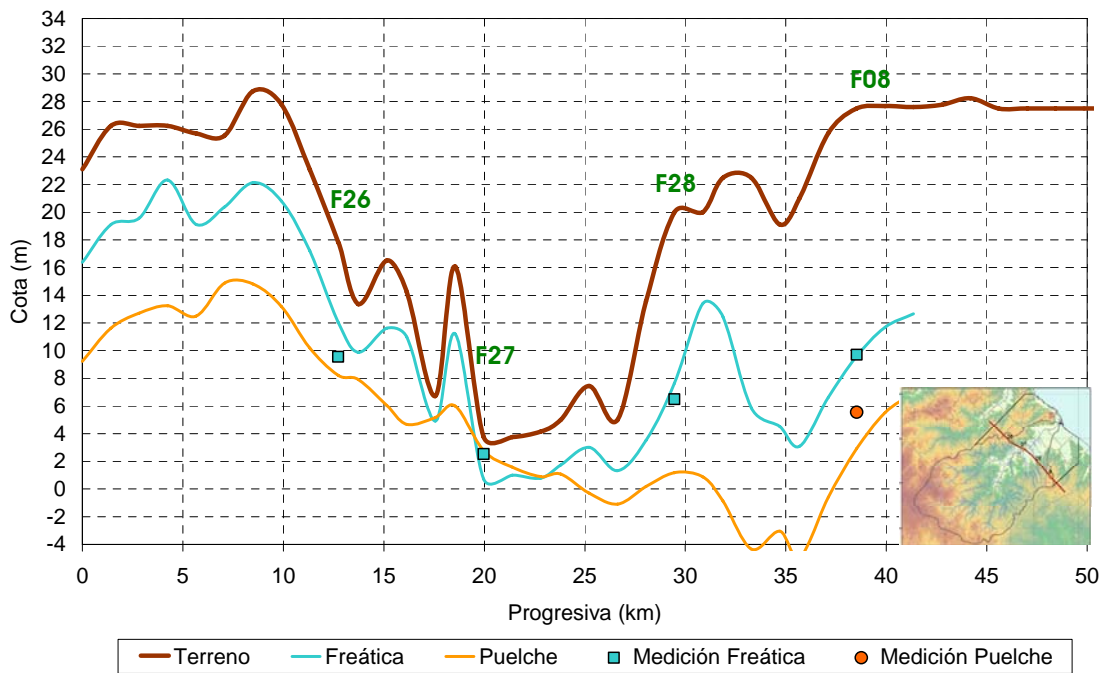
a) Corte AA



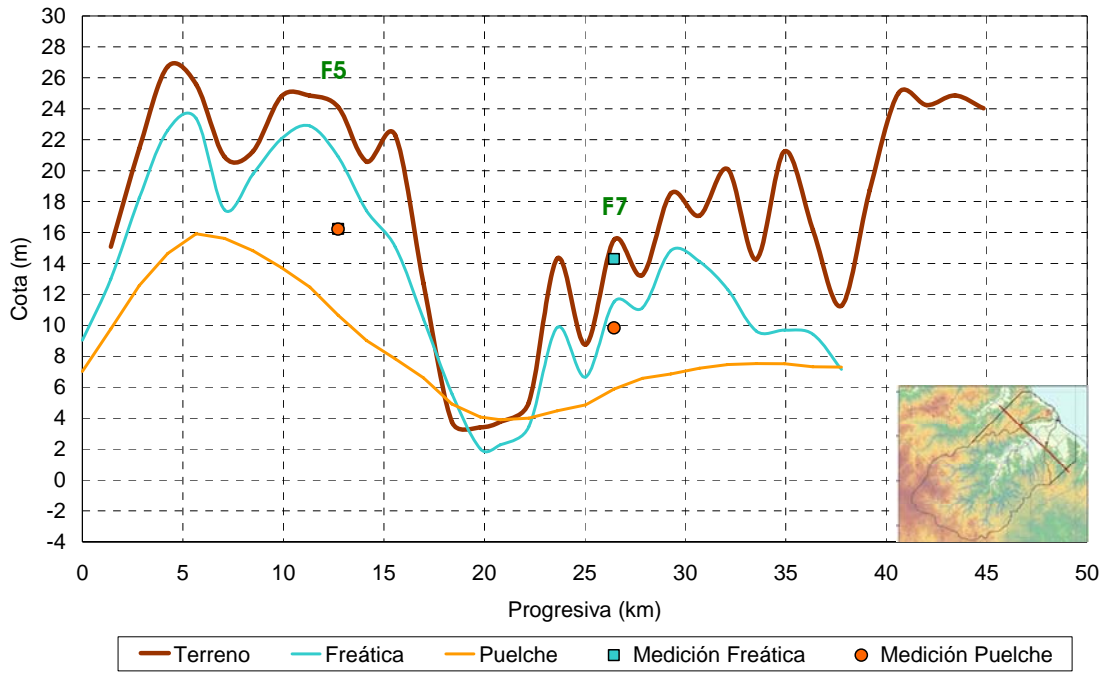
b) Corte BB



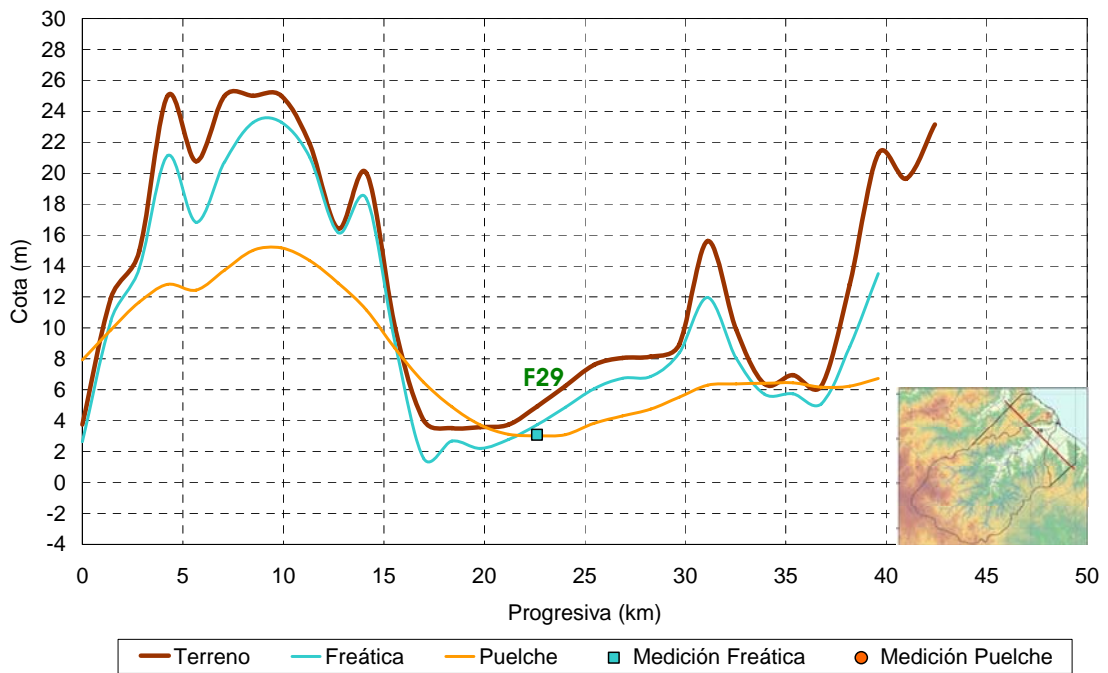
c) Corte CC



d) Corte DD



e) Corte EE



f) Corte FF

Figura 3.1.6. Distribuciones transversales de niveles freático y piezométrico para noviembre de 2008.

Una segunda forma de validación consistió en comparar isofreáticas e isopiezas construidas por el INA (2003) para junio de 2003, en base a mediciones, con las resultantes del modelo para ese mismo mes. Cabe destacar que las curvas del INA surgen por interpolación automática de una cantidad limitada de puntos de observación, lo cual no es una práctica recomendable por los errores que se cometen cuando existen variaciones espaciales de escala menor a la de la red de medición, como es el caso para la cuenca media y baja, y la densidad de puntos es heterogénea. Entonces, sólo se utilizan a los fines de comparar patrones (en lugar de valores absolutos) en esa zona. La Figura 3.1.7 muestra las isofreáticas, mientras que la Figura 3.1.8 presenta las isopiezas. El acuerdo general de los patrones se considera satisfactorio. Además, el acuerdo cuantitativo se considera bueno en la cuenca alta, donde las variaciones espaciales son relativamente suaves y los efectos de impermeabilización pequeños.

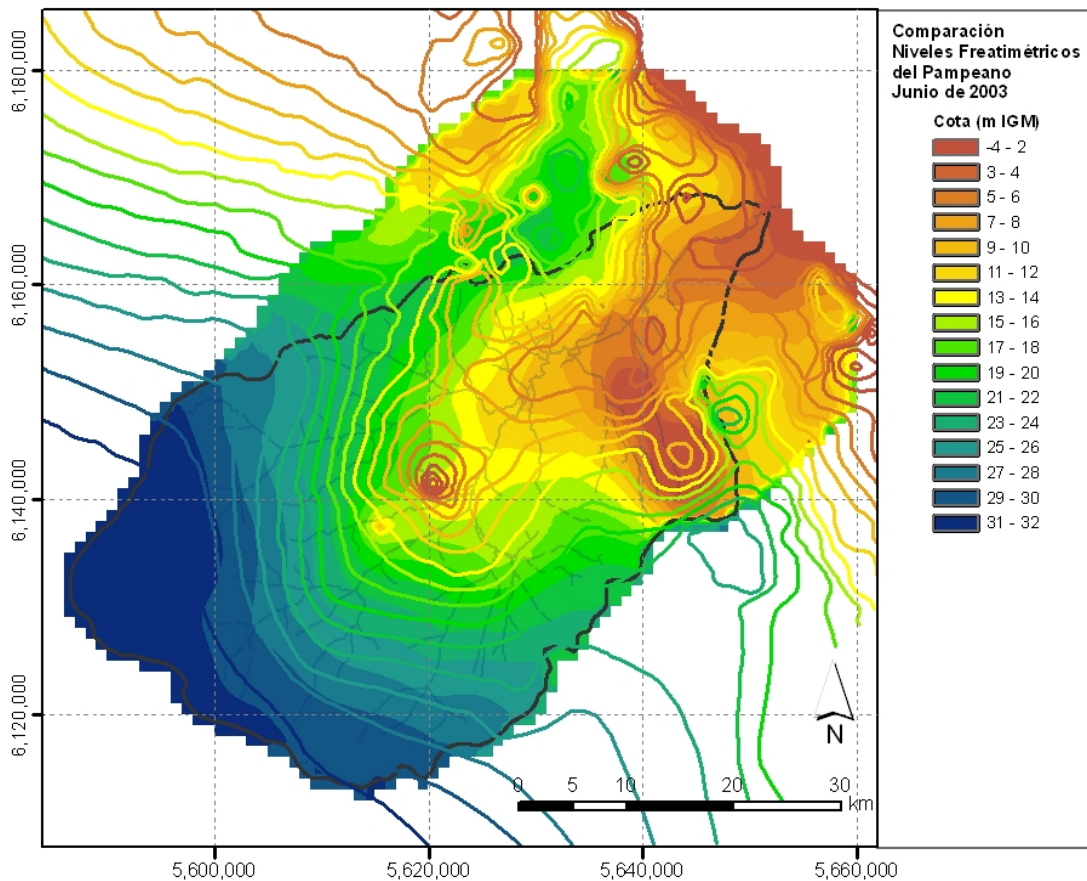
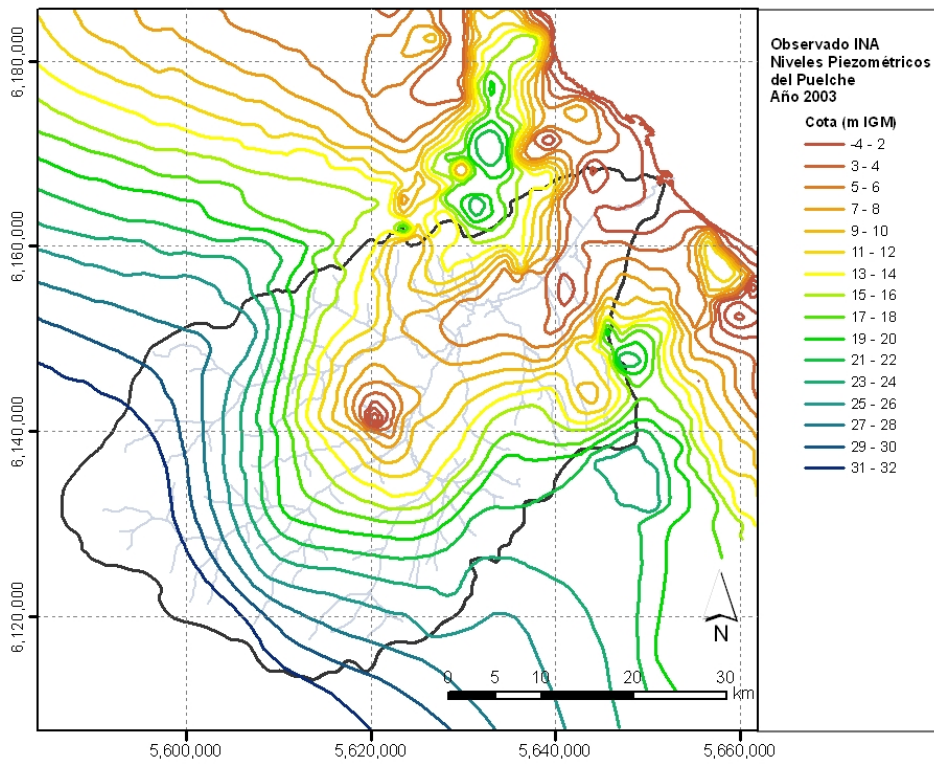
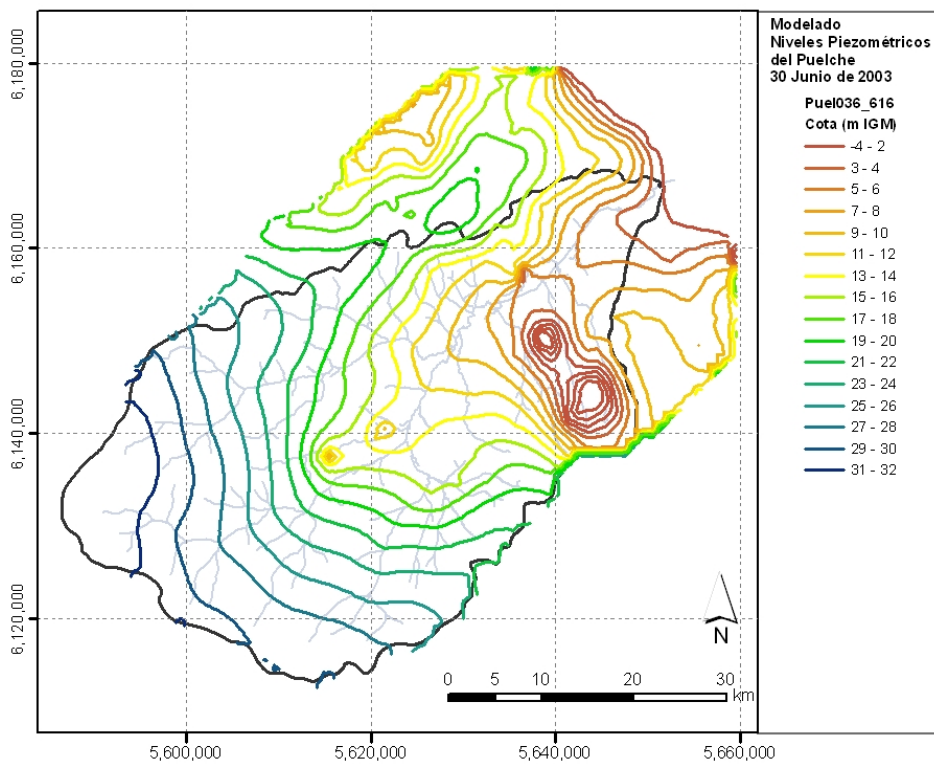


Figura 3.1.7. Distribución de niveles freáticos para junio de 2003. Curvas: observaciones; pintado: modelo.



a) Observaciones



b) Modelo

Figura 3.1.8. Distribución de niveles piezométricos para junio de 2003.

La tercera forma de validación se basó en comparar series temporales de niveles freáticos. Se dispuso de datos correspondientes al establecimiento SAF Argentina (HIDROAR 2005), cuya localización se muestra en la Figura 3.1.9, para los períodos 2001-2003 y Febrero 2005-Agosto 2005. La Figura 3.1.10 presenta la comparación entre esos datos y la serie temporal de niveles freáticos de acuerdo al modelo; se incluyen también los niveles piezométricos, por completitud. Se observa que el modelo representa con relativa precisión las tendencias de los datos, lo que muestra que es capaz de capturar la dinámica del sistema.



Figura 3.1.9. Ubicación de SAF Argentina.

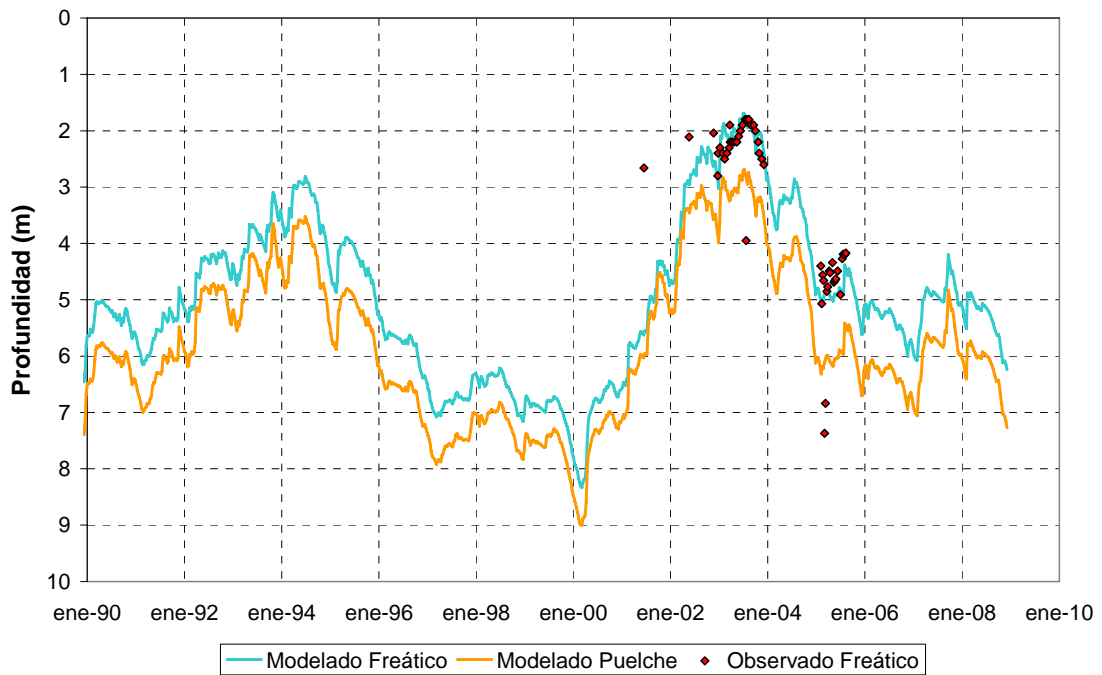
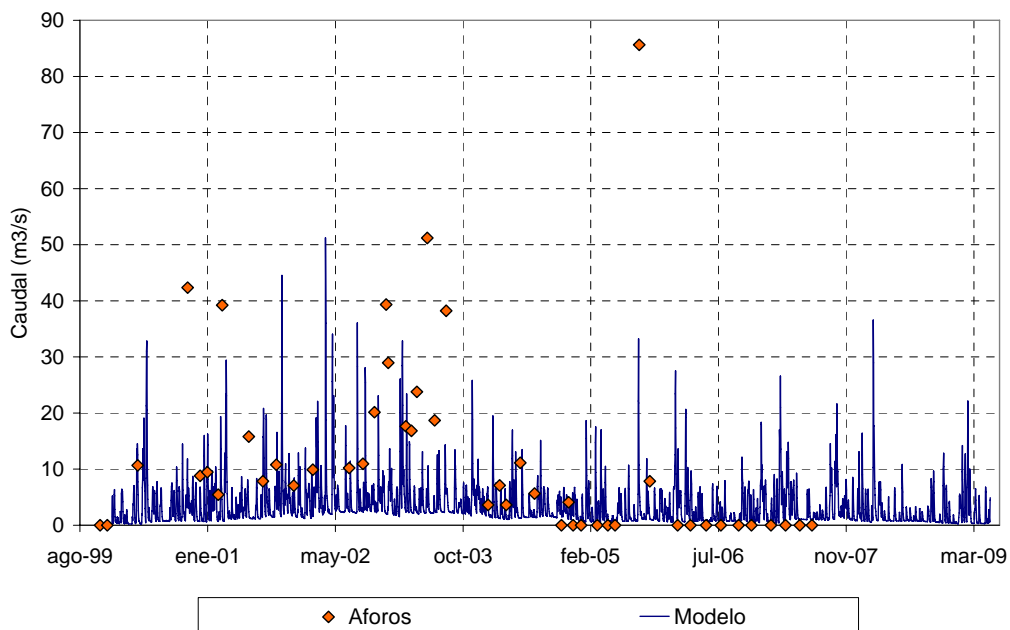
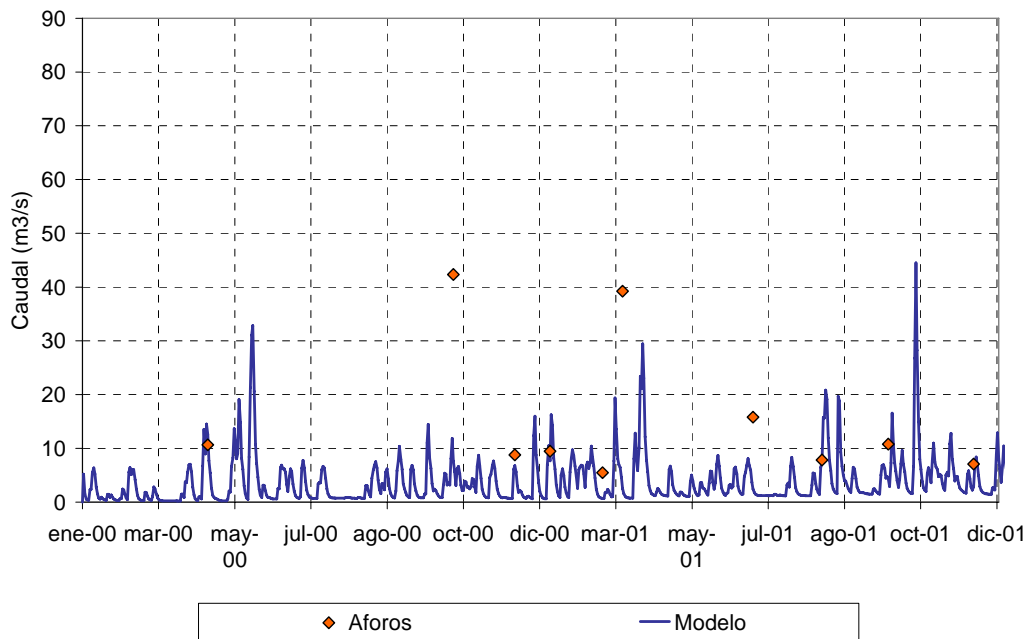


Figura 3.1.10. Serie temporal de niveles freático y piezométrico (Puelche).

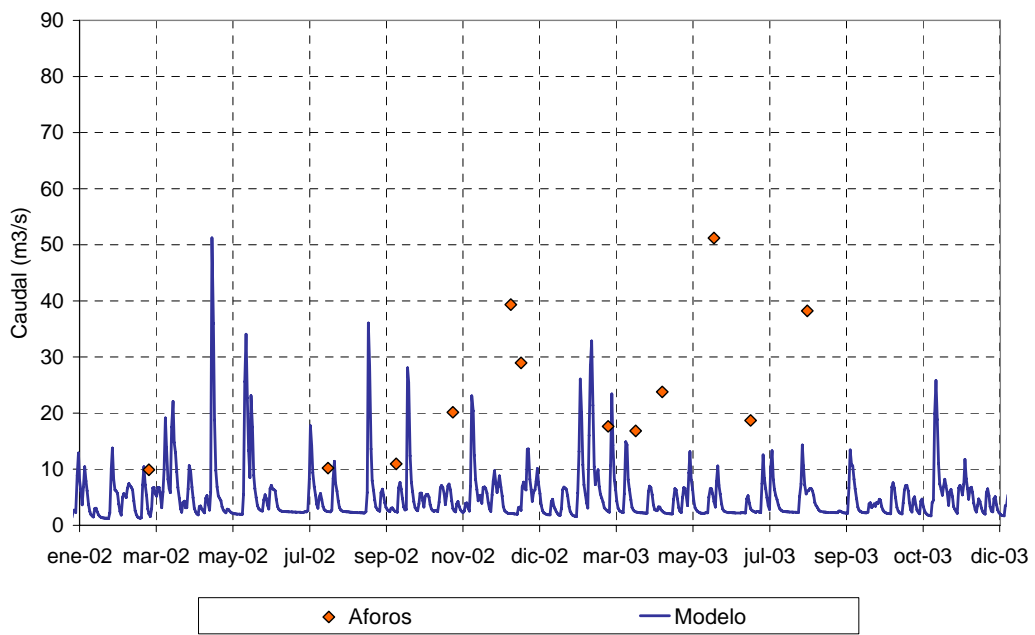
Finalmente, la cuarta forma de validación consistió en comparar los caudales aforados en la sección de la Autopista Riccheri, sobre el tramo rectificado del río Matanza, con los provistos por el modelo, tal como se muestra en la Figura 3.1.11. Se observa que el modelo representa el orden de magnitud correcto, aunque subestima los caudales.



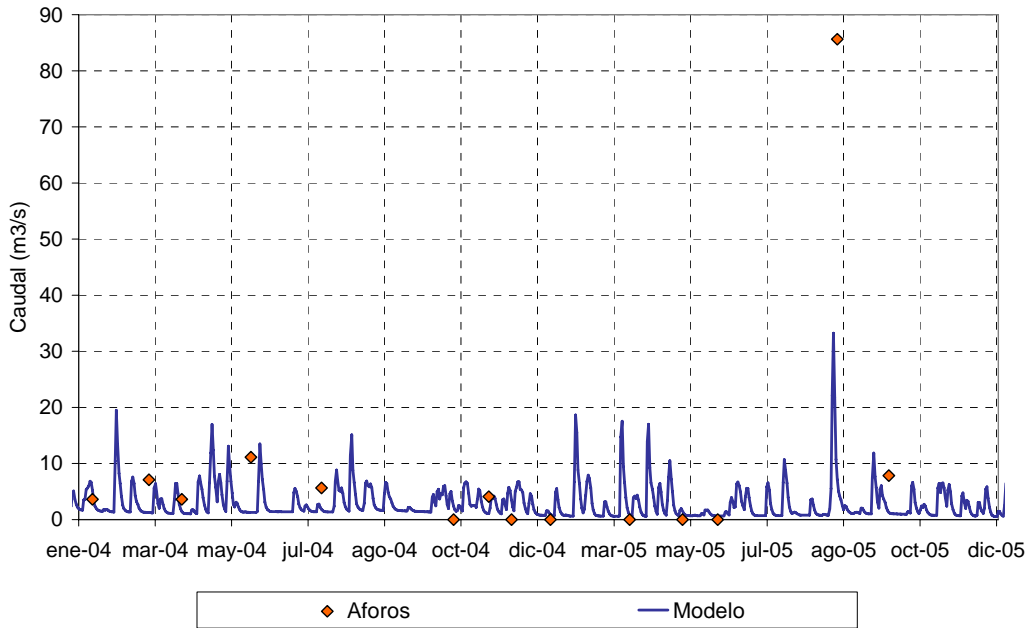
a) Período 2000-2009



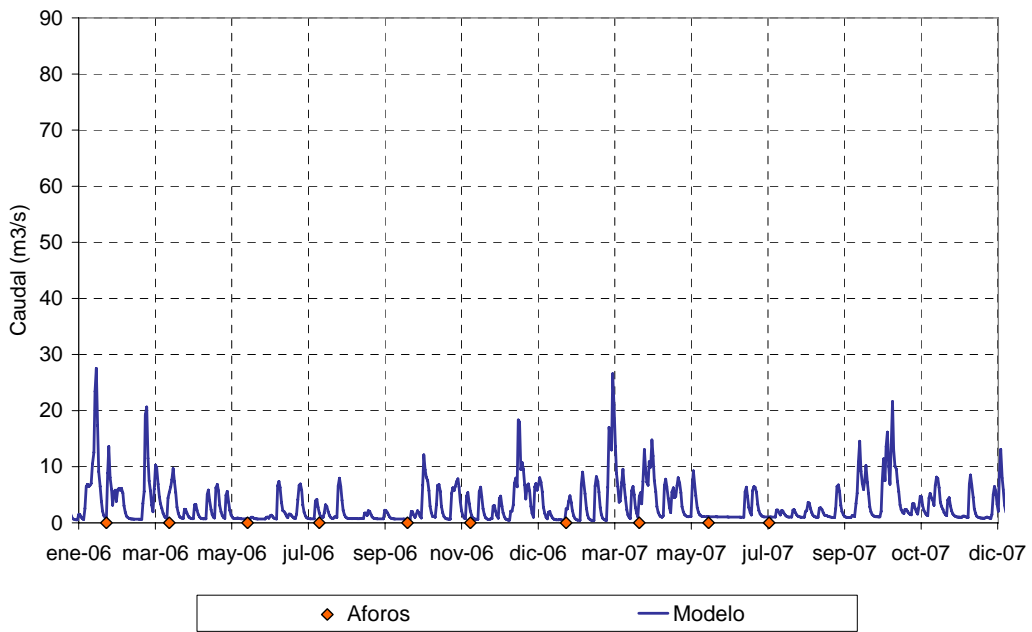
b) Período 2000-2001



c) Período 2002-2003



d) Período 2004-2006



e) Período 2006-2009

Figura 3.1.11. Caudales en Autopista Riccheri

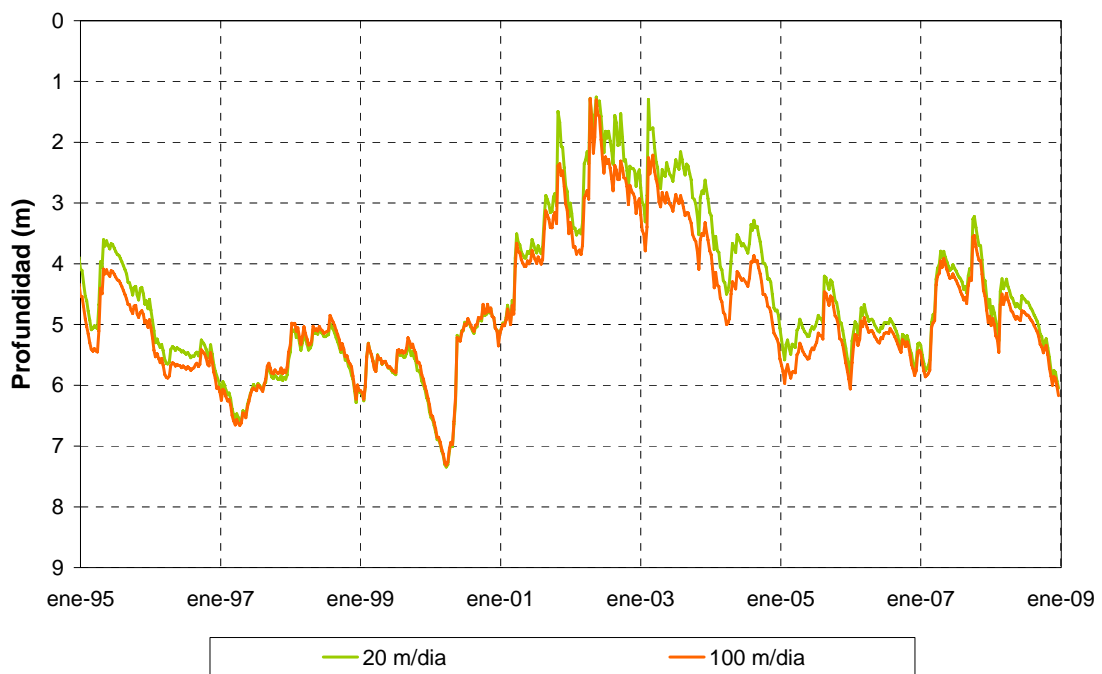
3.2 Análisis de sensibilidad

Antes de proceder a la calibración, se efectuaron análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a variaciones en los parámetros, de modo de contribuir a identificar a aquellos de más alto impacto. Cabe aclarar que los ensayos variando la conductividad se llevaron a cabo con la misma versión incompleta del modelo utilizada en la validación.

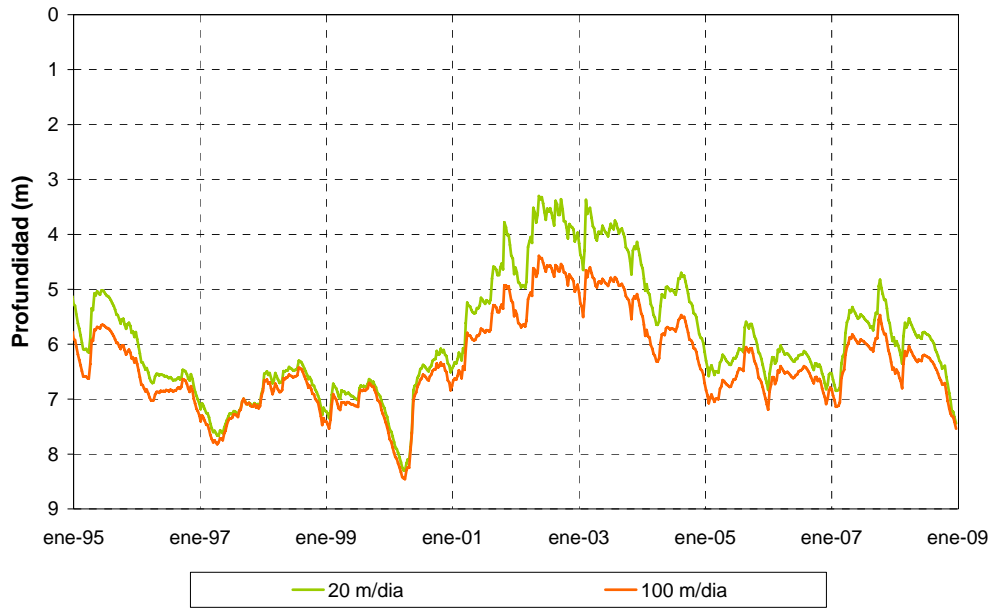
3.2.1 Conductividad horizontal

Se quintuplicó la conductividad horizontal del acuífero Puelche, desde el valor establecido de 20 m/d a 100 m/d. En la Figura 3.2.1 se muestra la evolución de los niveles freático (Pampeano) y piezométrico (Puelche) para un punto de control ubicado en La Matanza ('Pozo 14', Figura 3.2.2). Se observa que pueden llegar a producirse disminuciones de hasta aproximadamente 0,30 m en el nivel freático, mientras que el nivel piezométrico puede disminuir en más de 1 metro.

La Figura 3.2.3 muestra distribuciones espaciales instantáneas de los niveles freáticos y piezométricos para 5 cortes a través de la cuenca para la situación de base (20 m/d), mientras que la Figura 3.2.4 hace lo propio para el caso de análisis (100 m/d). De la comparación surge que el incremento de conductividad conduce a la suavización de los gradientes, tanto en sentido longitudinal como transversal al eje de la cuenca, lo que implica, en general, una disminución de los niveles en las zonas con cotas topográficas localmente elevadas, y viceversa. Además, se observa que aumenta la diferencia de niveles entre ambos acuíferos.



a) Nivel freático



b) Nivel piezométrico

Figura 3.2.1. Sensibilidad de los niveles de agua subterránea a la conductividad horizontal del Puelche para un punto de control en La Matanza (Pozo 14).

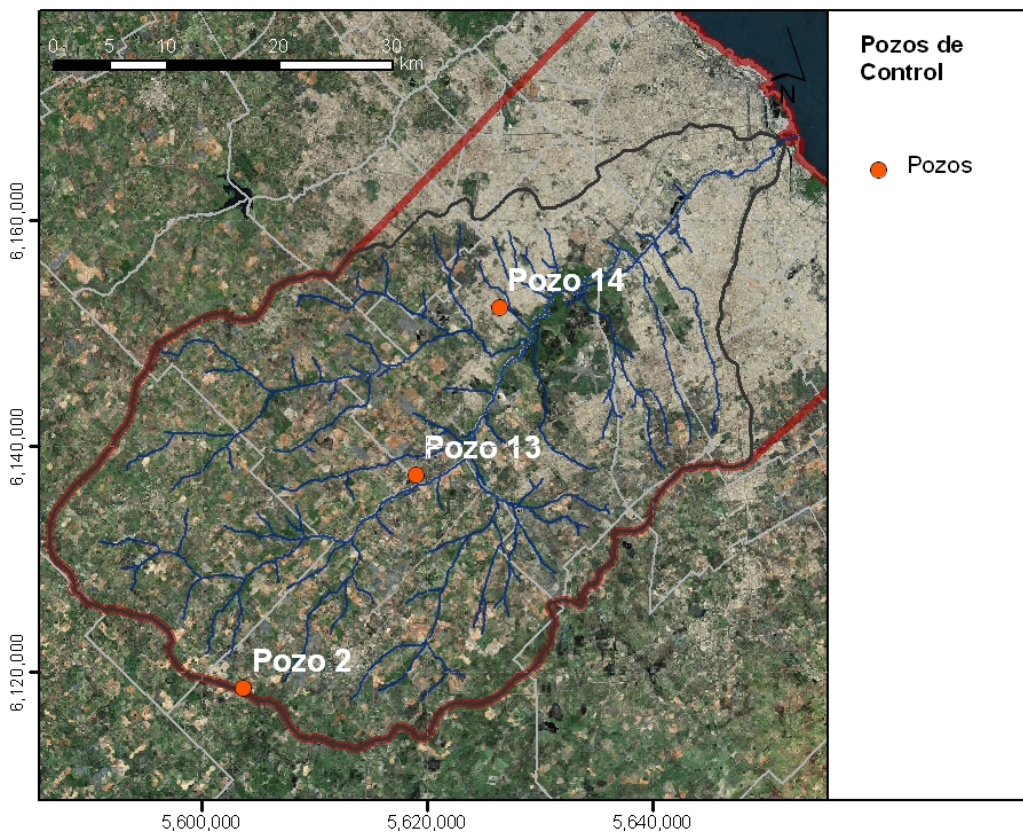
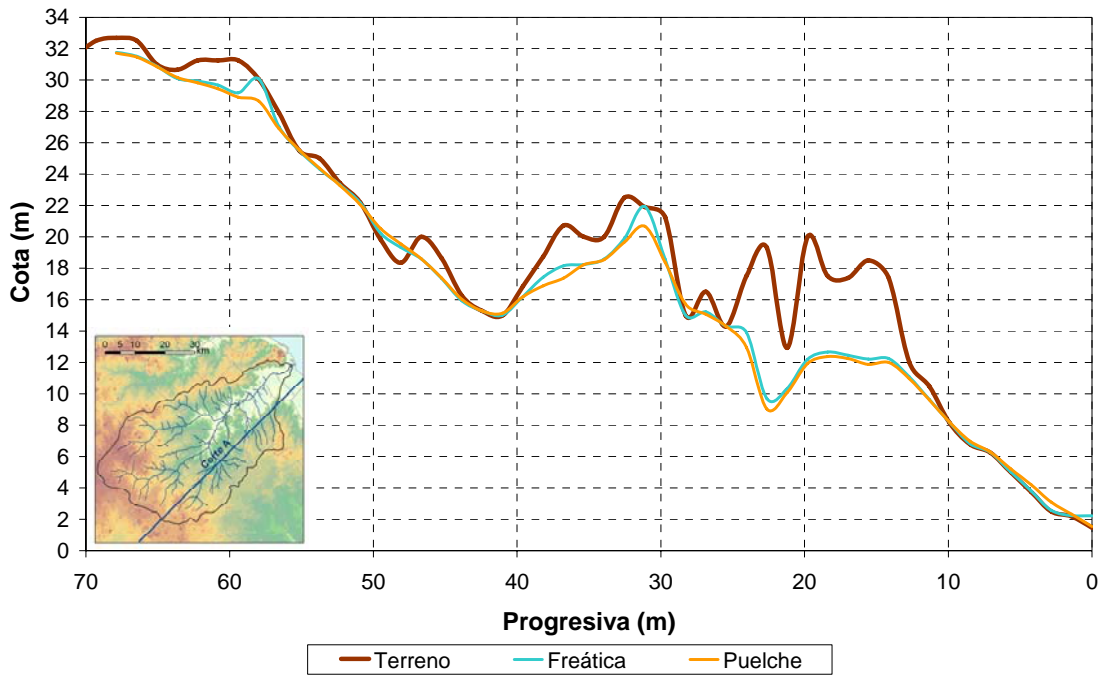
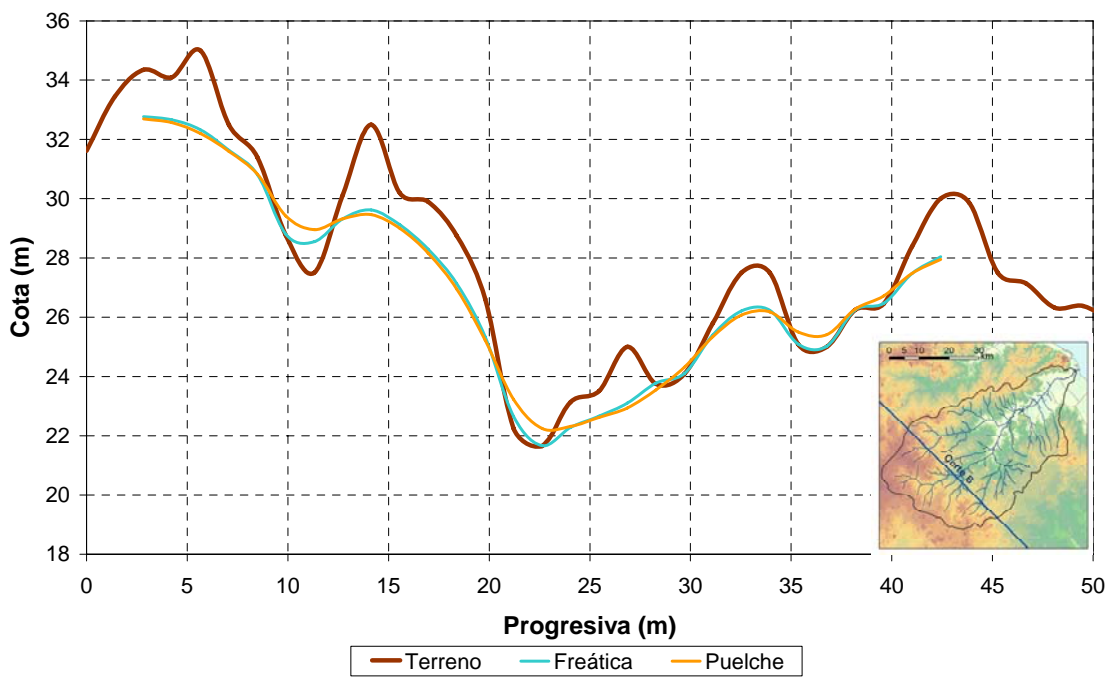


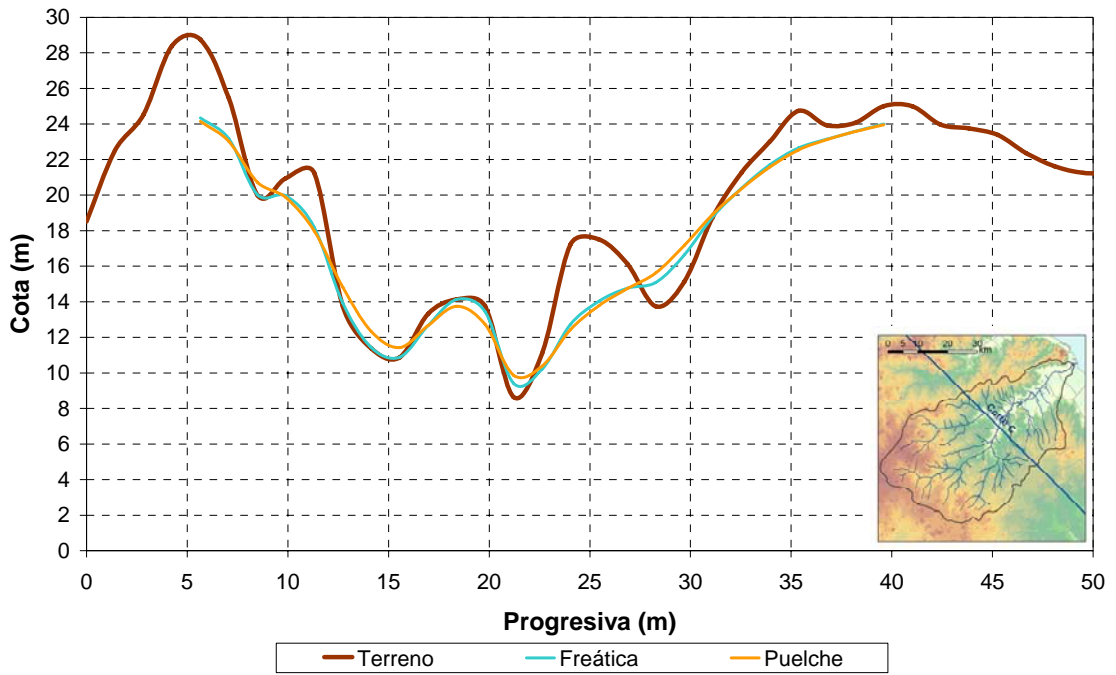
Figura 3.2.2. Ubicación de puntos de control.



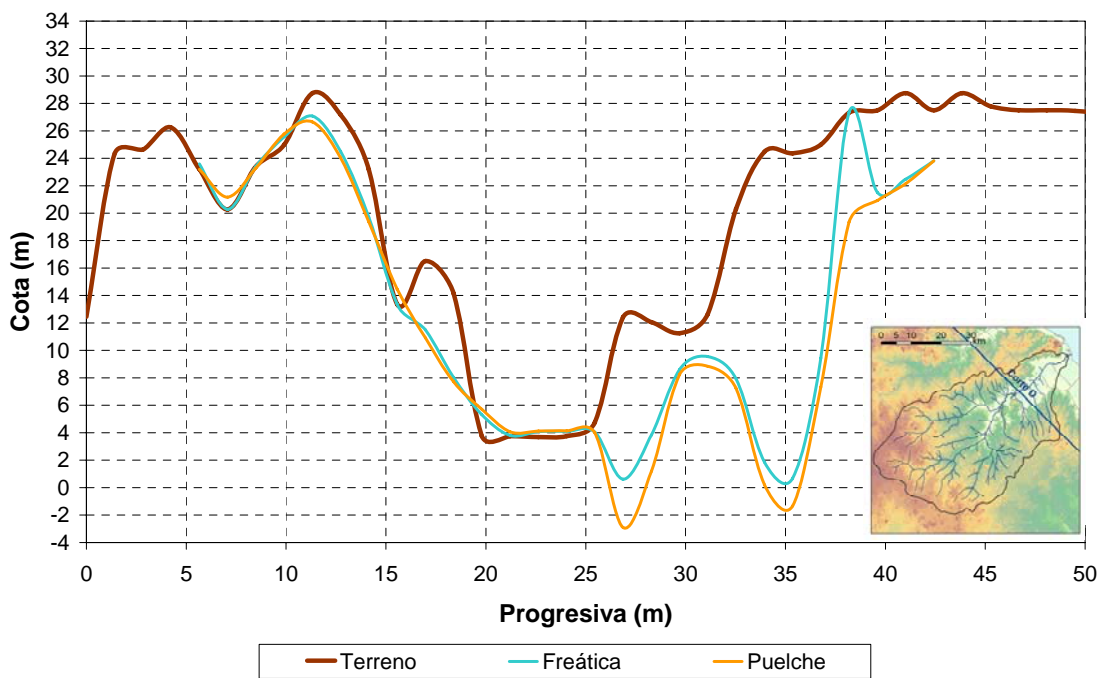
a) Corte A



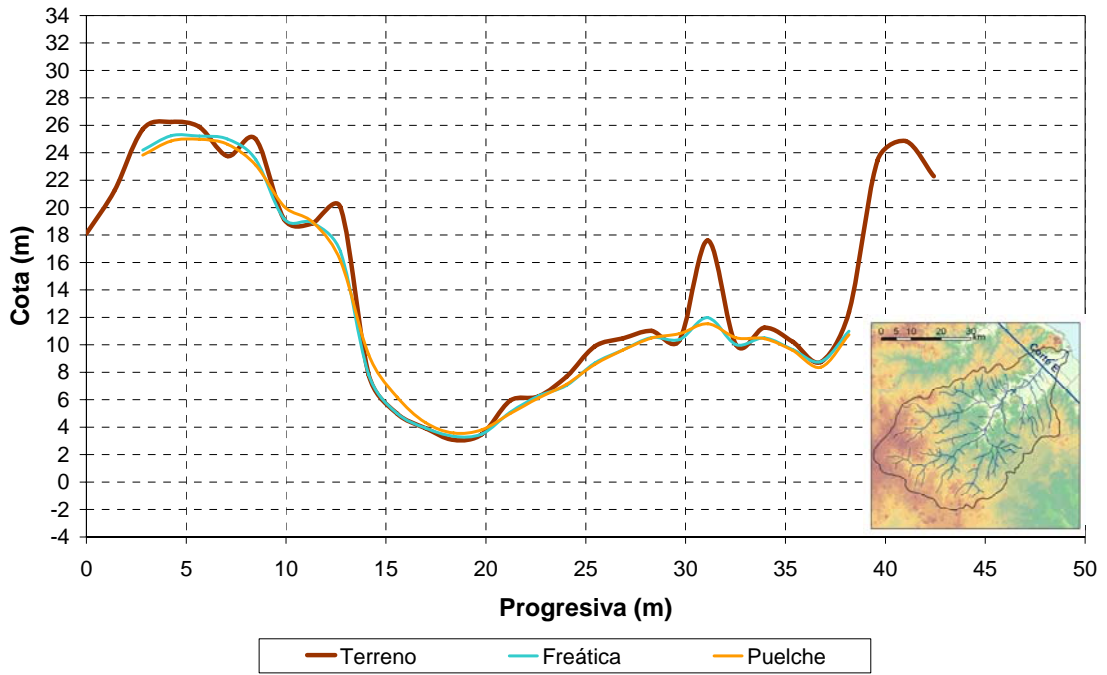
b) Corte B



c) Corte C

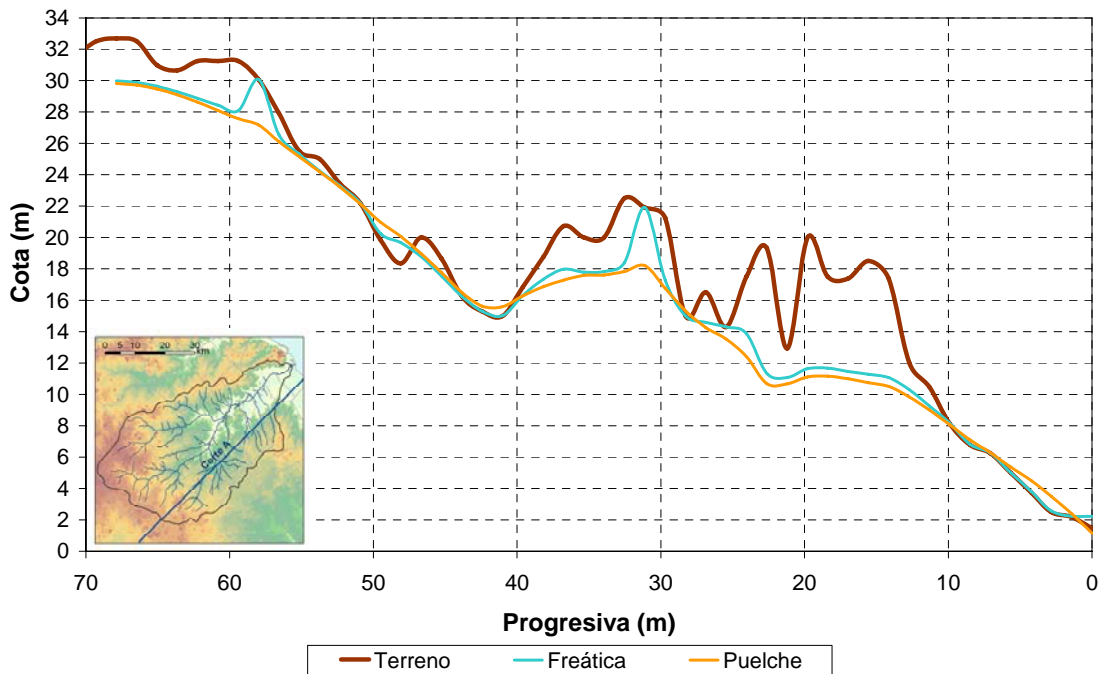


d) Corte D

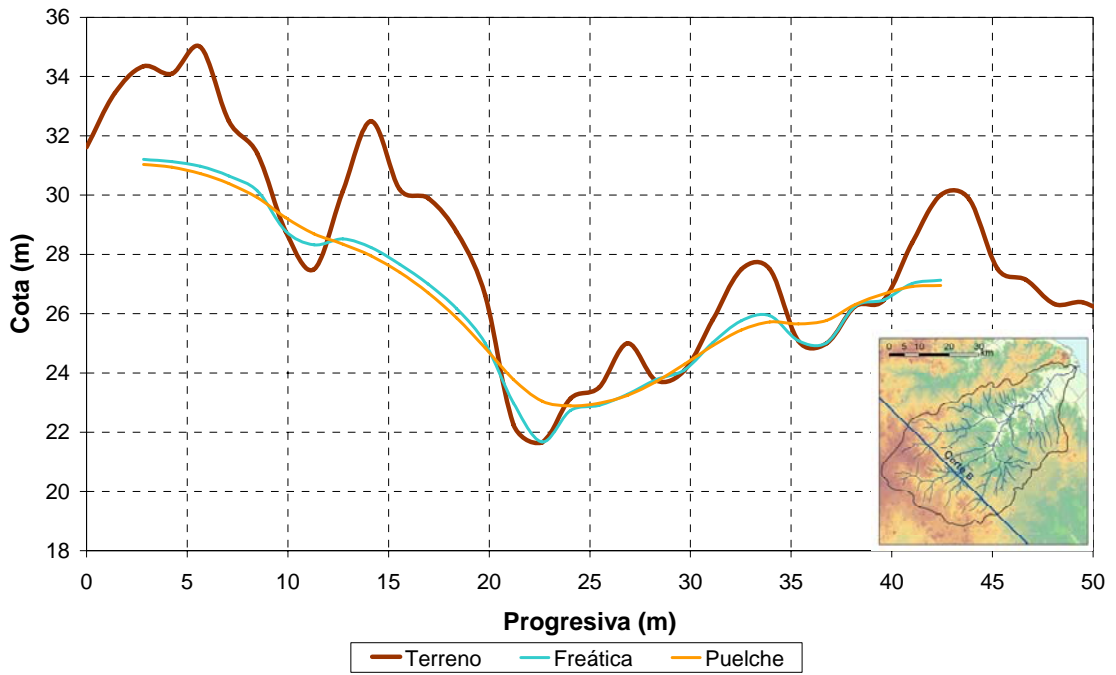


e) Corte E

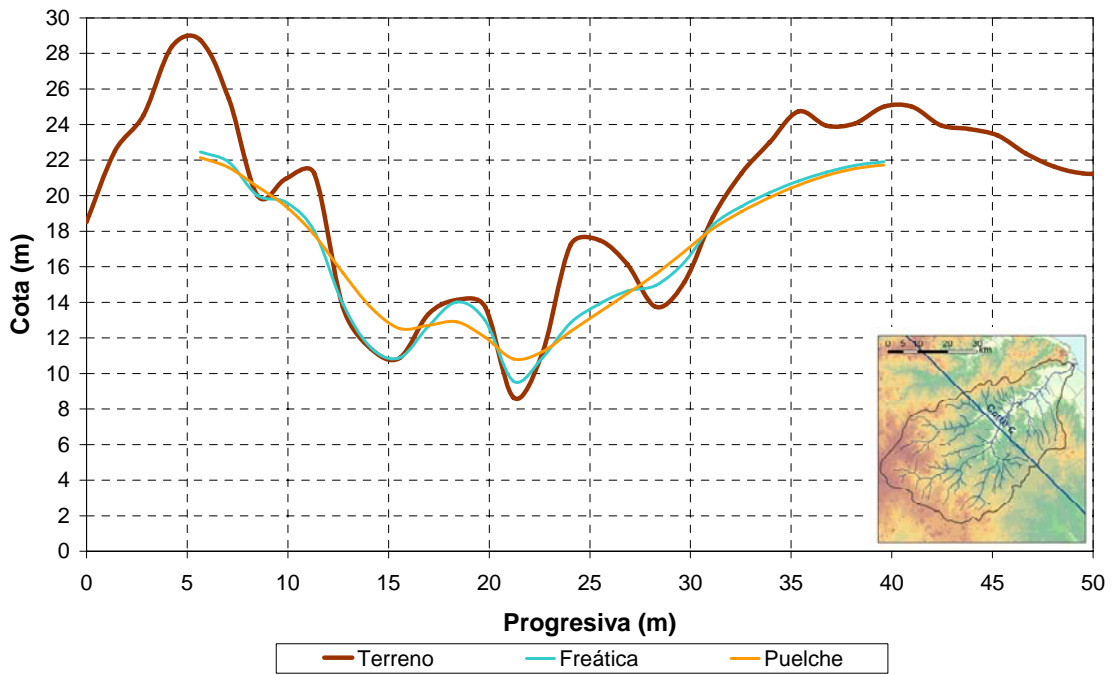
Figura 3.2.3. Distribuciones longitudinales de niveles freático y piezométrico (Puelche) a lo largo de cortes, para la situación de base.



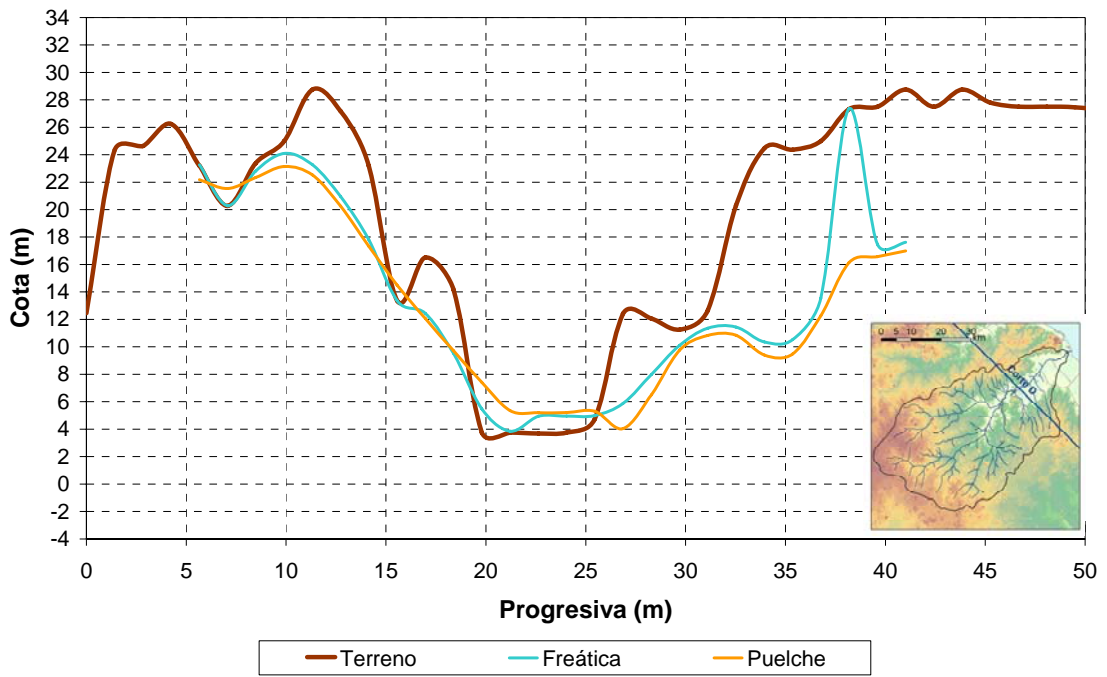
a) Corte A



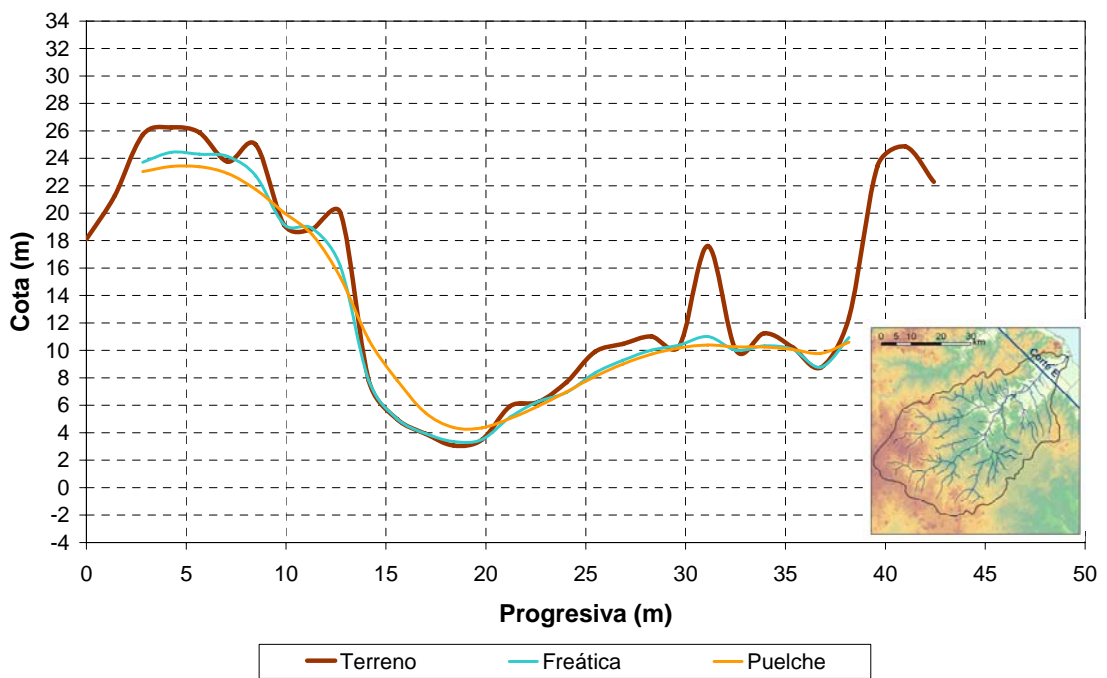
b) Corte B



c) Corte C



d) Corte D



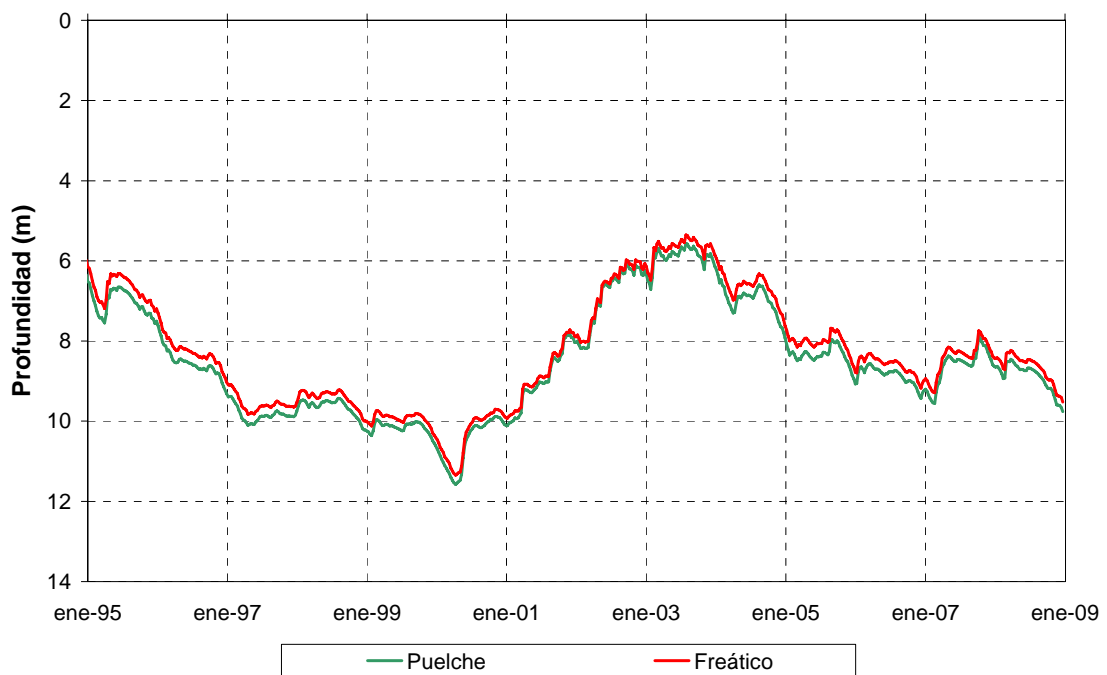
e) Corte E

Figura 3.2.4. Distribuciones longitudinales de niveles freático y piezométrico (Puelche) a lo largo de cortes, para el caso de conductividad horizontal del acuífero Puelche incrementada (de 20 m/d a 100 m/d).

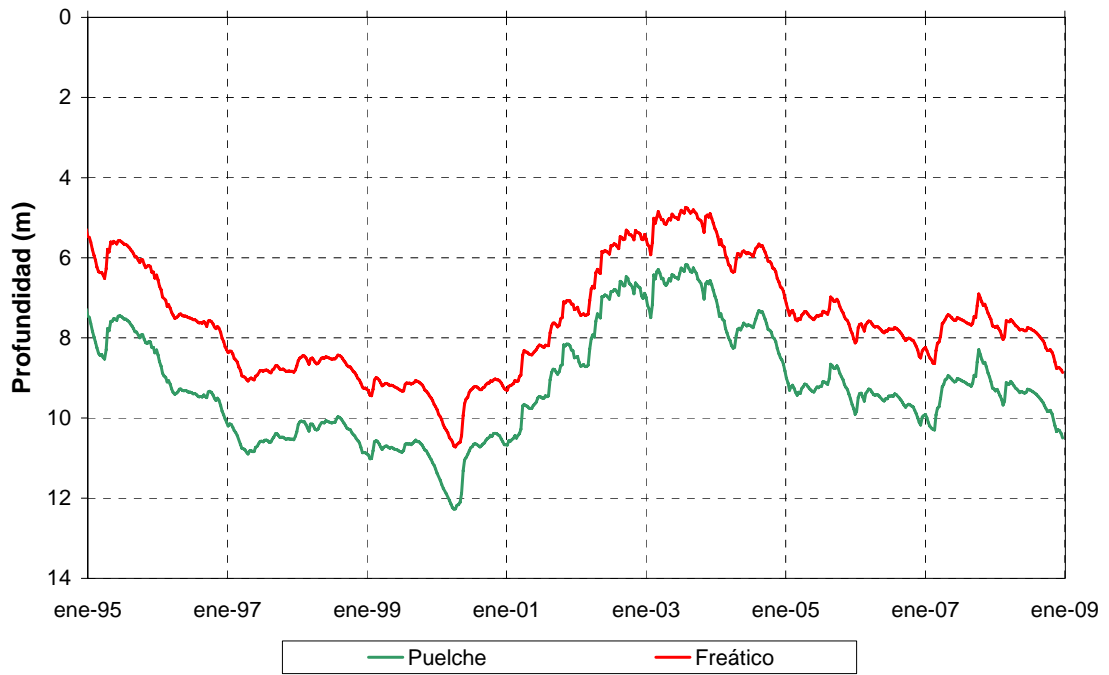
3.2.2 Conductividad vertical

Manteniendo la conductividad horizontal del Puelche en 100 m/d, se disminuyó en un orden de magnitud la conductividad vertical del acuitardo, desde 5 mm/d a 0,5 mm/d. Las Figuras 3.2.5 y 3.2.6 presenta los niveles freático y piezométrico para dos puntos de control ('Pozo 2' y 'Pozo 13', ver Figura 3.2.2). Se observa que, desde una diferencia máxima entre niveles del orden de los 0,30 m, se pasa a una de más de 1,50 m en el Pozo 2 y de alrededor de 1 m en el Pozo 13.

En la Figura 3.2.7 se muestran los cortes. Comparando con la Figura 3.2.4 se observa que la disminución de la conductividad vertical del acuitardo se manifiesta, principalmente, en una variación significativa del nivel piezométrico, que tiende a disminuir en zonas con cotas topográficas localmente elevadas, y viceversa. El aumento de la diferencia de niveles entre ambos acuíferos es aún más pronunciada que en el caso anterior.

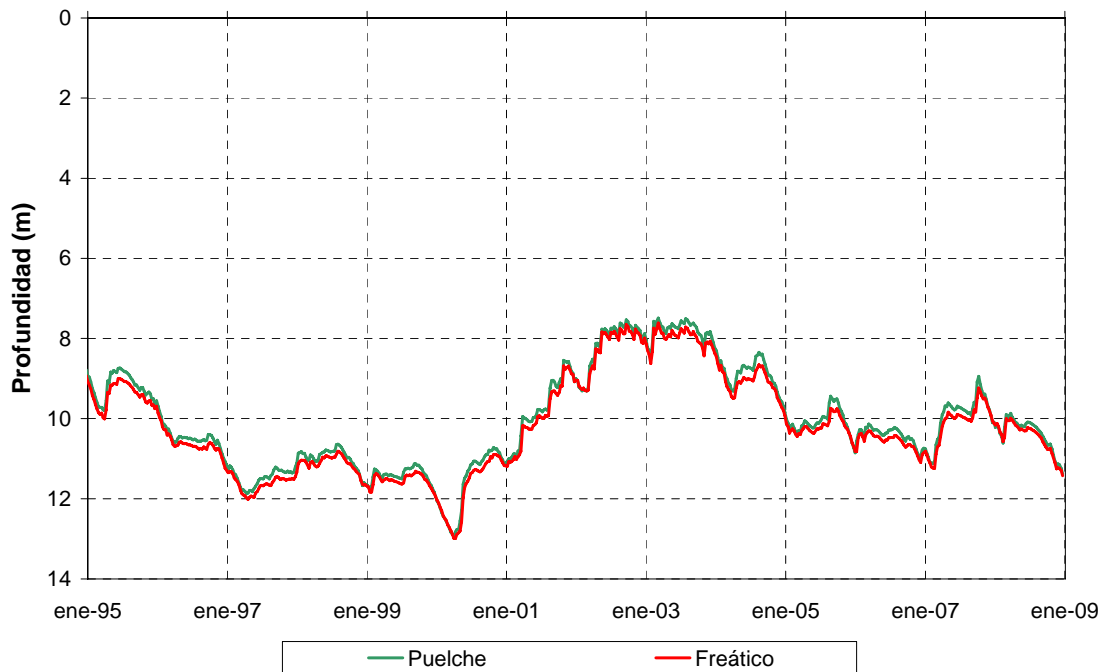


a) 5 mm/d

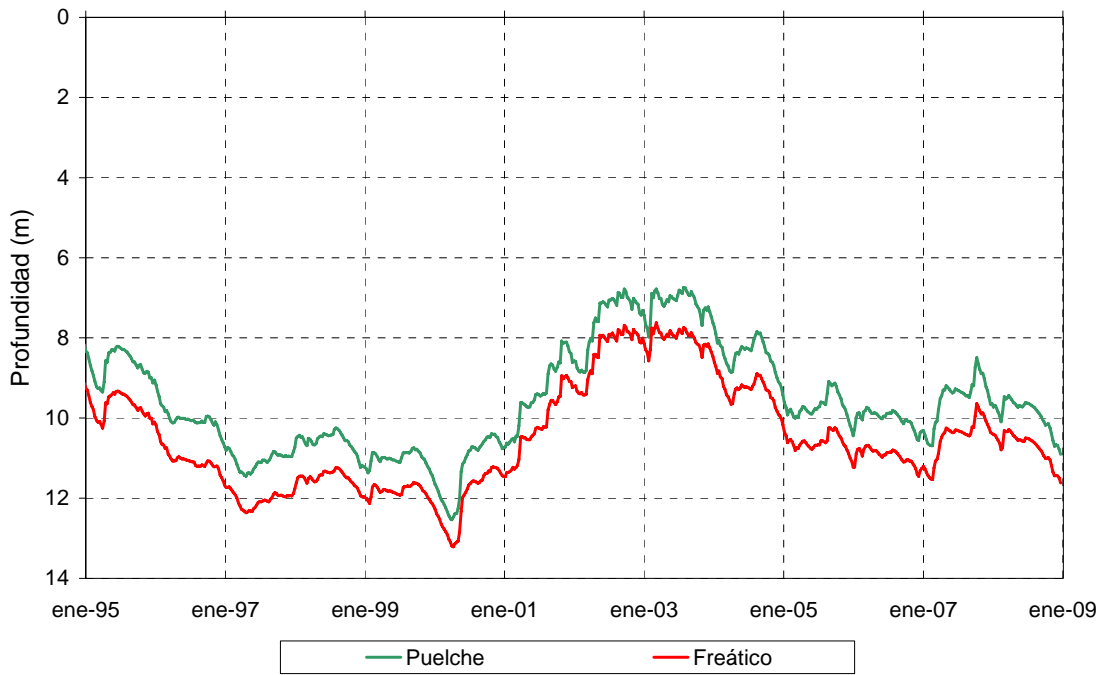


b) 0,5 mm/d.

Figura 3.2.5. Sensibilidad de los niveles de agua subterránea a la conductividad horizontal del Puelche para el punto de control 'Pozo 2'.

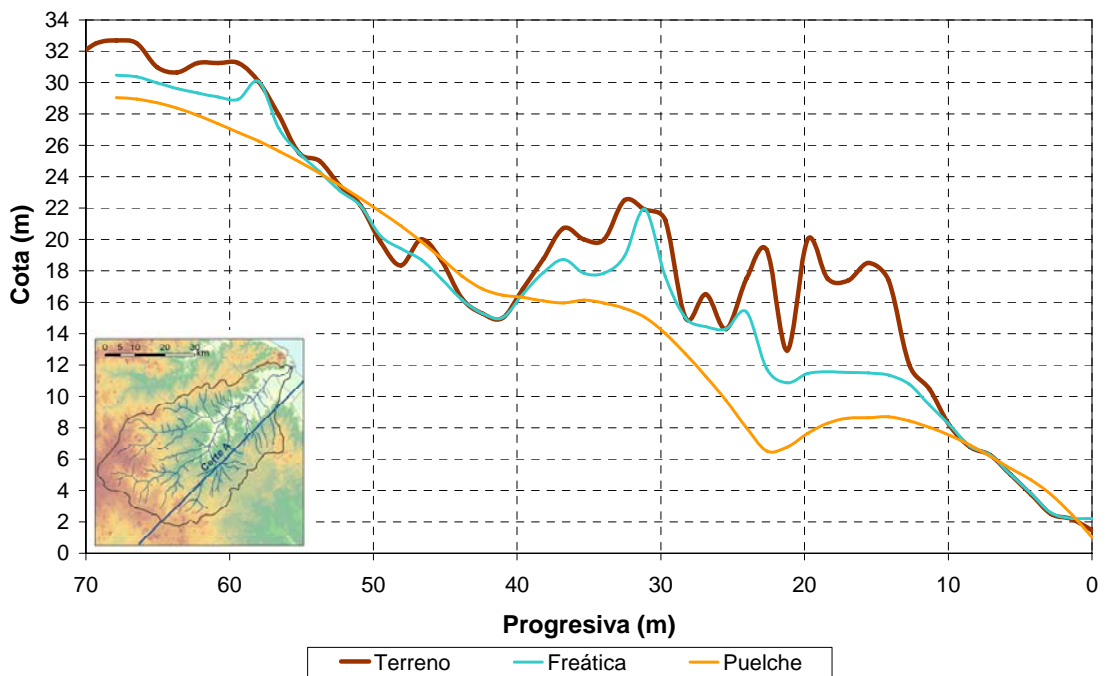


a) 5 mm/d

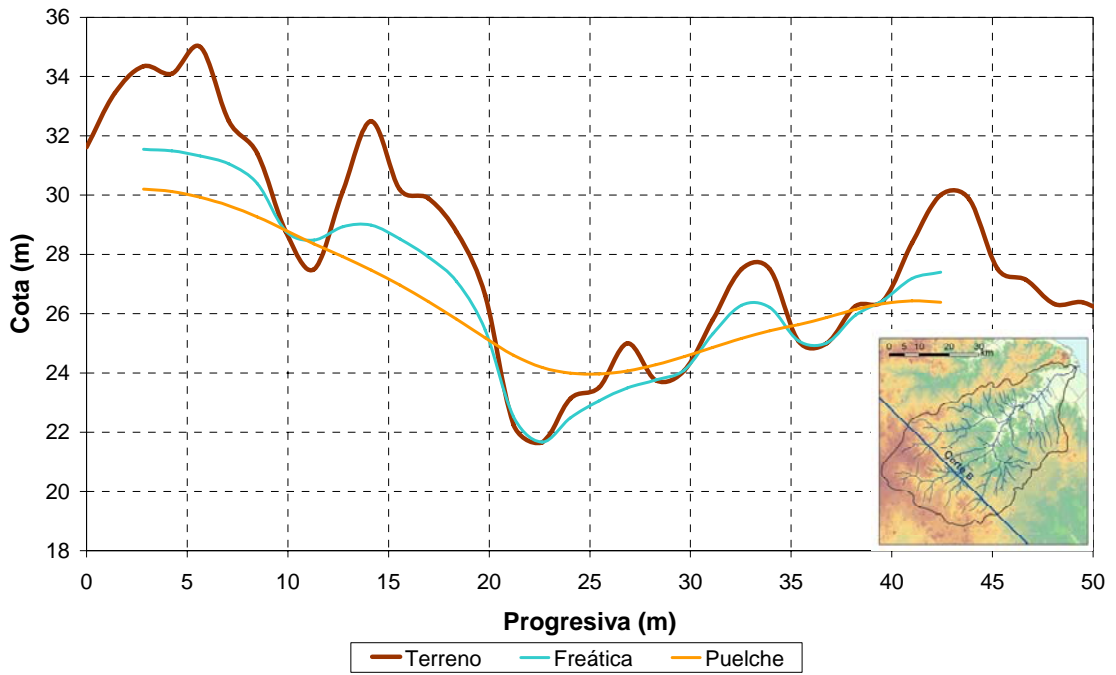


b) 0,5 mm/d.

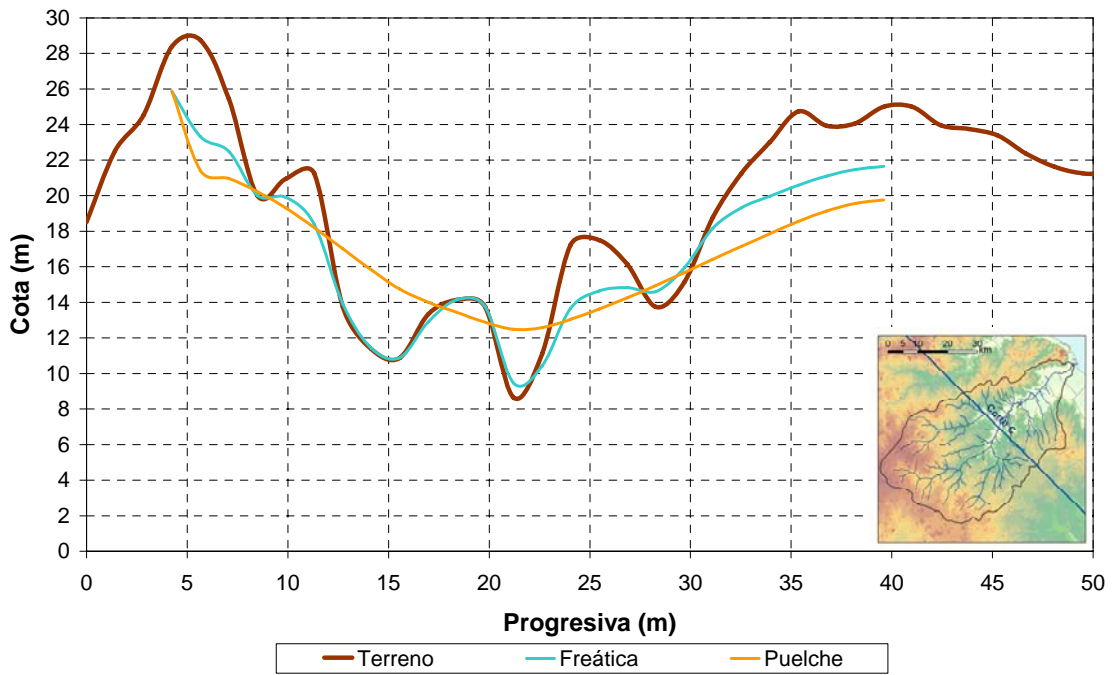
Figura 3.2.6. Sensibilidad de los niveles de agua subterránea a la conductividad horizontal del Puelche para el punto de control 'Pozo 13'.



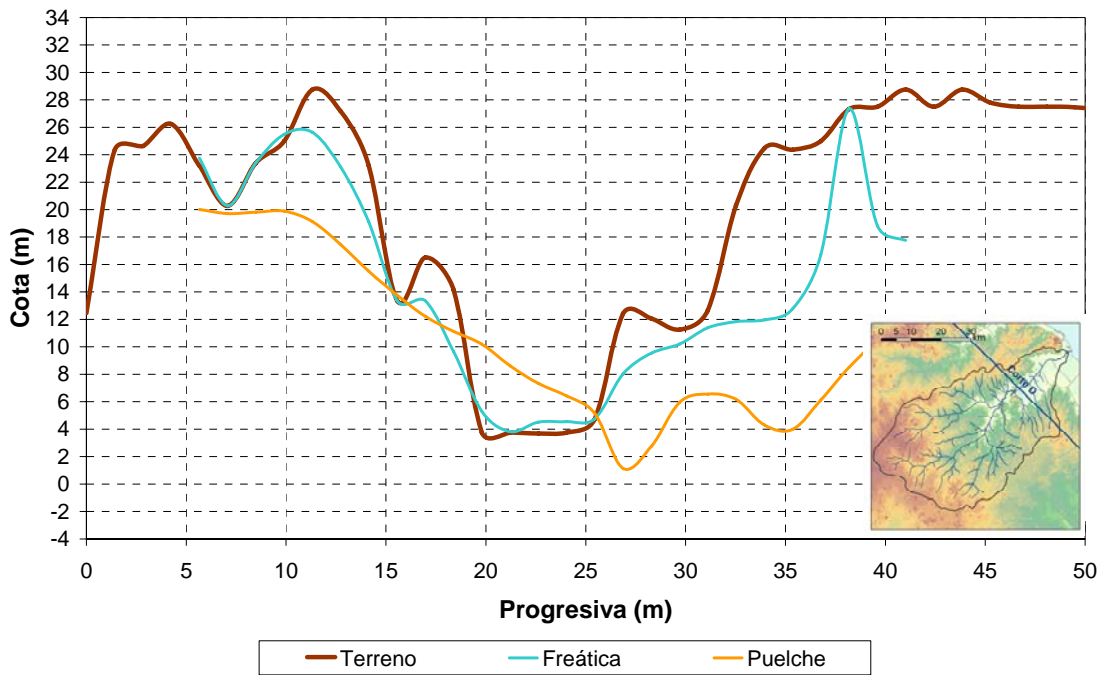
a) Corte A



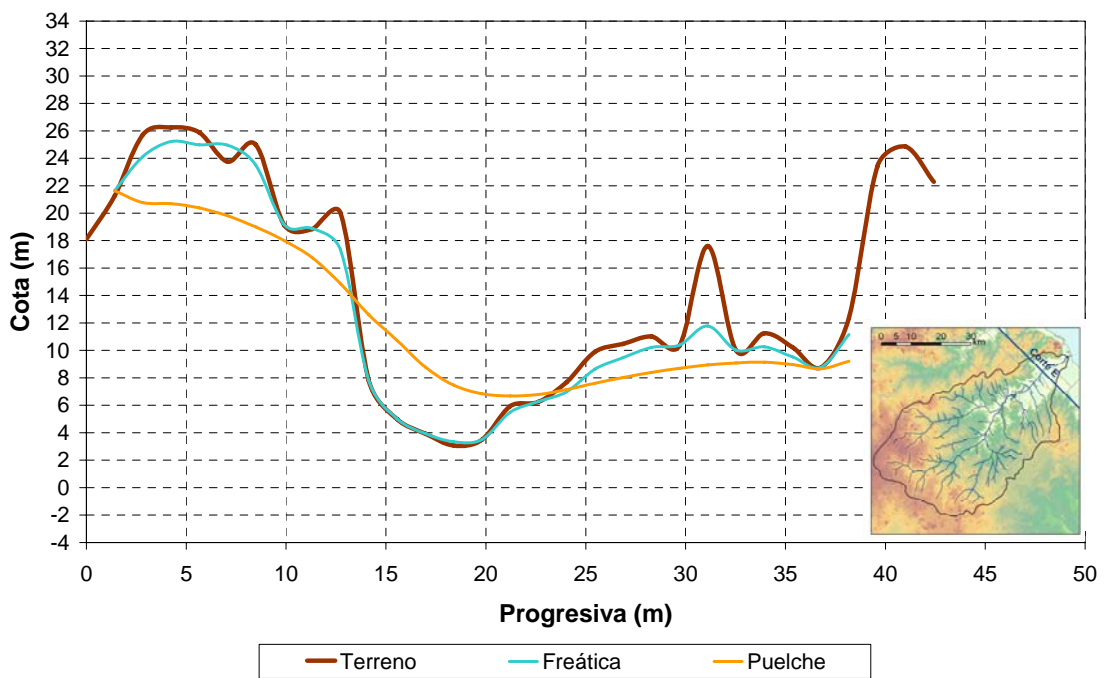
b) Corte B



c) Corte C



d) Corte D



e) Corte E

Figura 3.2.7. Distribuciones longitudinales de niveles freático y piezométrico (Puelche) a lo largo de cortes, para la el caso de conductividad vertical del acuitardo disminuida (de 5 m/d a 0,5 m/d).

3.2.3 Coeficiente de rugosidad de Manning

Se incrementó el coeficiente de rugosidad de Manning de las planicies desde 0,20 a 0,33, lo que significaría considerar una situación donde adquiere peso el residuo de los cultivos de grano (Donigian et al. 1983). No se observaron variaciones en los niveles freáticos (Figura 3.2.8) ni en los caudales base. El aumento del coeficiente de rugosidad incrementa levemente la capacidad de almacenamiento superficial de la cuenca, lo que se manifiesta como una disminución de los picos de crecida, tal como se ilustra en la Figura 3.2.9 para el gran evento de crecida de octubre de 1967.

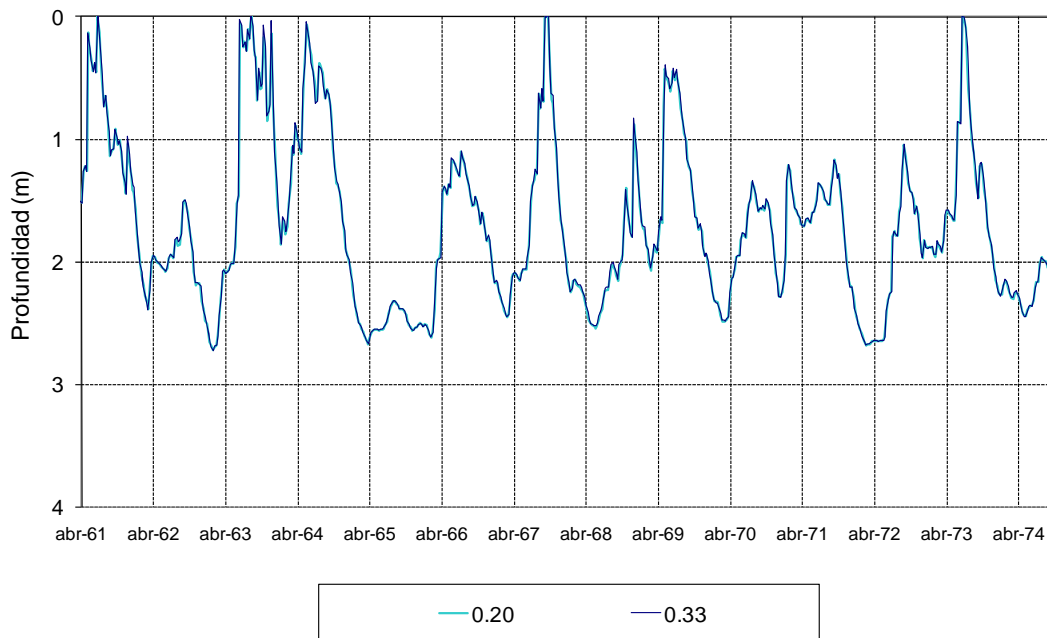


Figura 3.2.8. Serie temporal de nivel freático en el 'Pozo 2' de ACuMaR para diferentes valores del coeficiente de Manning.

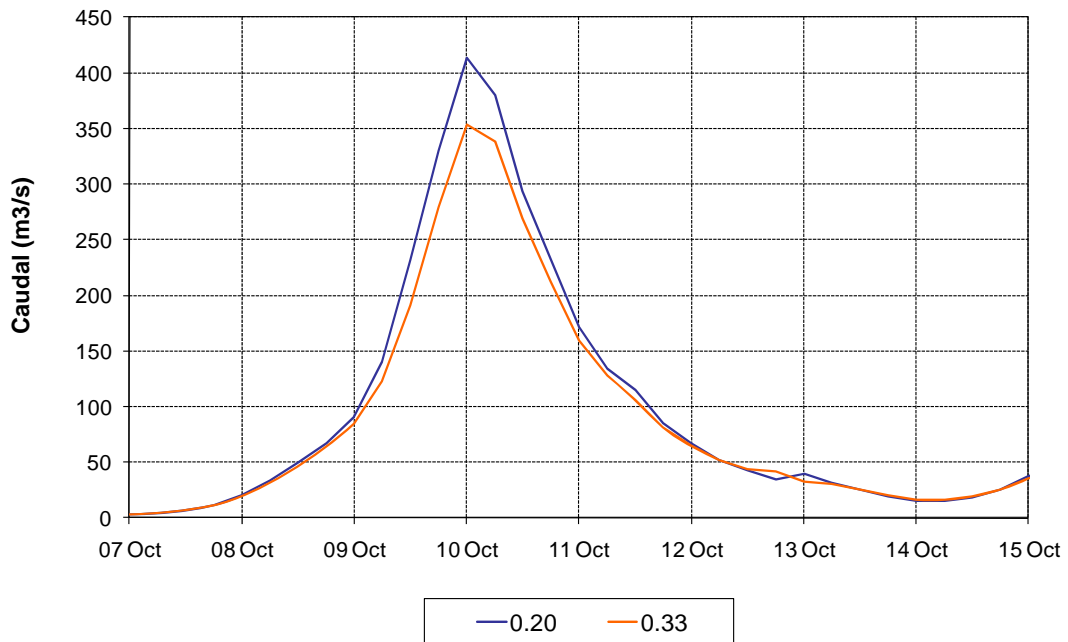
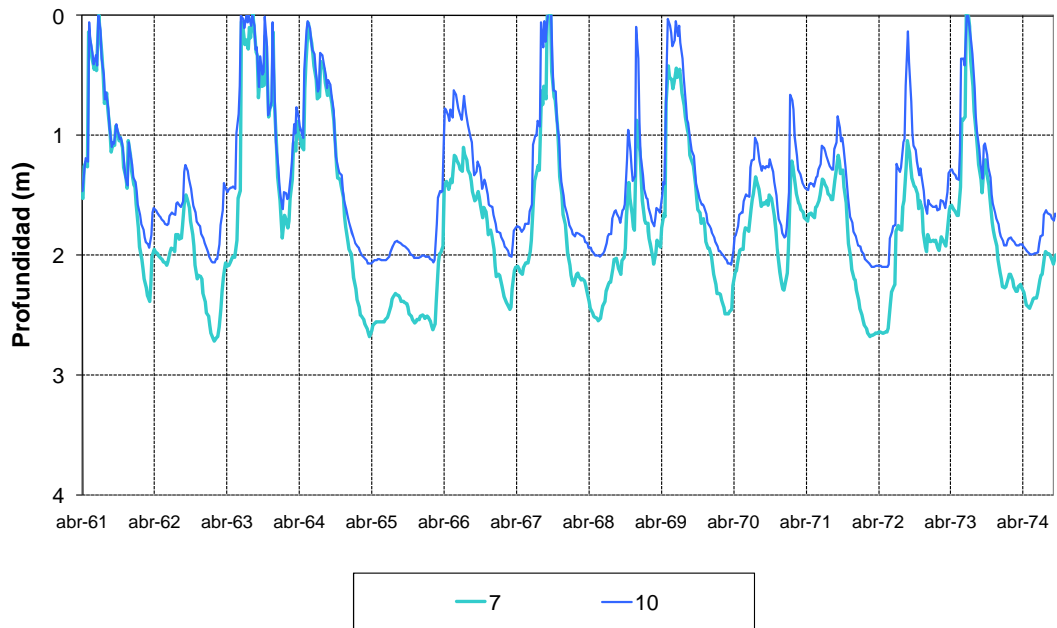


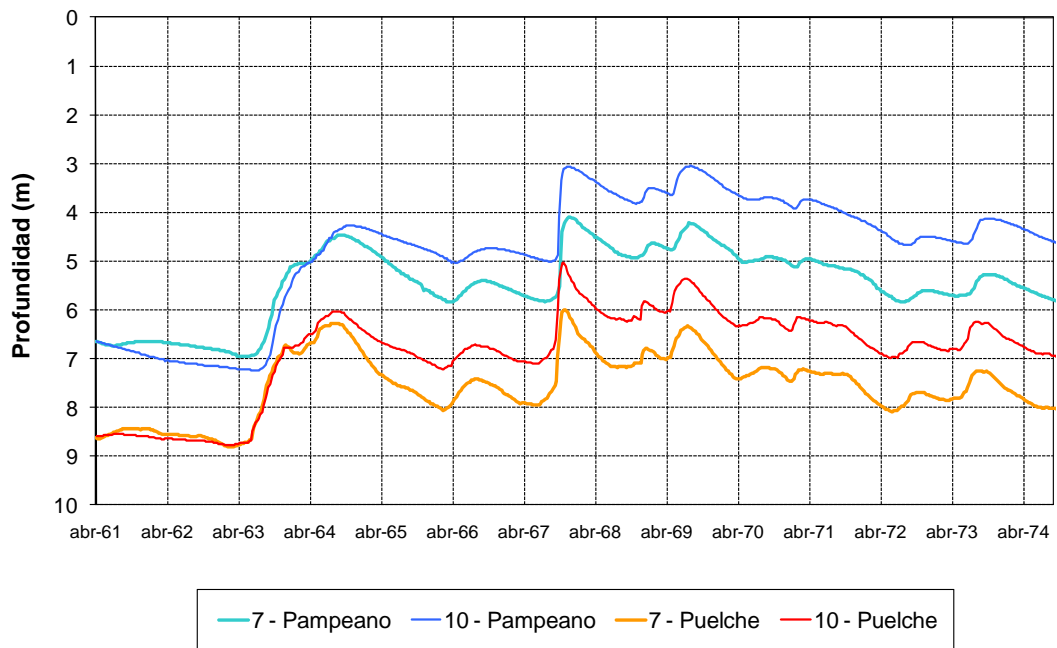
Figura 3.2.9. Serie temporal de caudal en Autopista Ricchieri durante el evento de crecida de octubre de 1967, para diferentes valores del coeficiente de Manning.

3.2.4 Parámetros de zona no saturada

En primer lugar, el Parámetro de Forma de la Curva de Conductividad Hidráulica se incrementó de 7 (representativo de limos) a 10 (arenas). En la Figura 3.2.10 se compara el comportamiento de los niveles de agua subterránea en dos ubicaciones. Se observa que aumentan tanto los niveles freáticos como los piezométricos, como era de esperarse por la mayor infiltración. Esto también se manifiesta en incrementos del caudal de base y del caudal pico asociado a las crecidas, tal como se ilustra en la Figura 3.2.11.

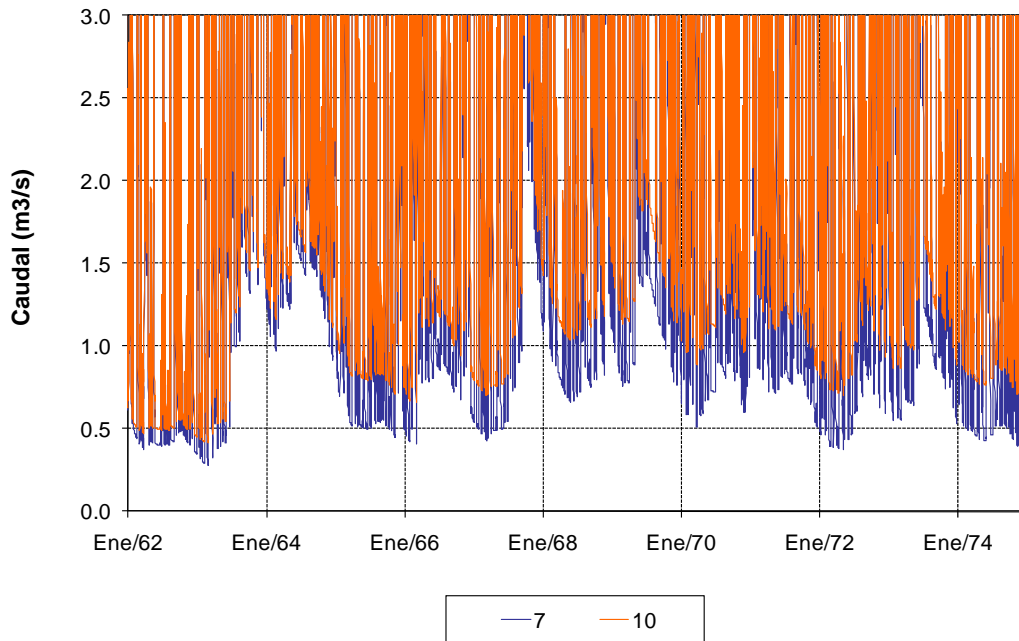


a) Nivel freático en 'Pozo 2'

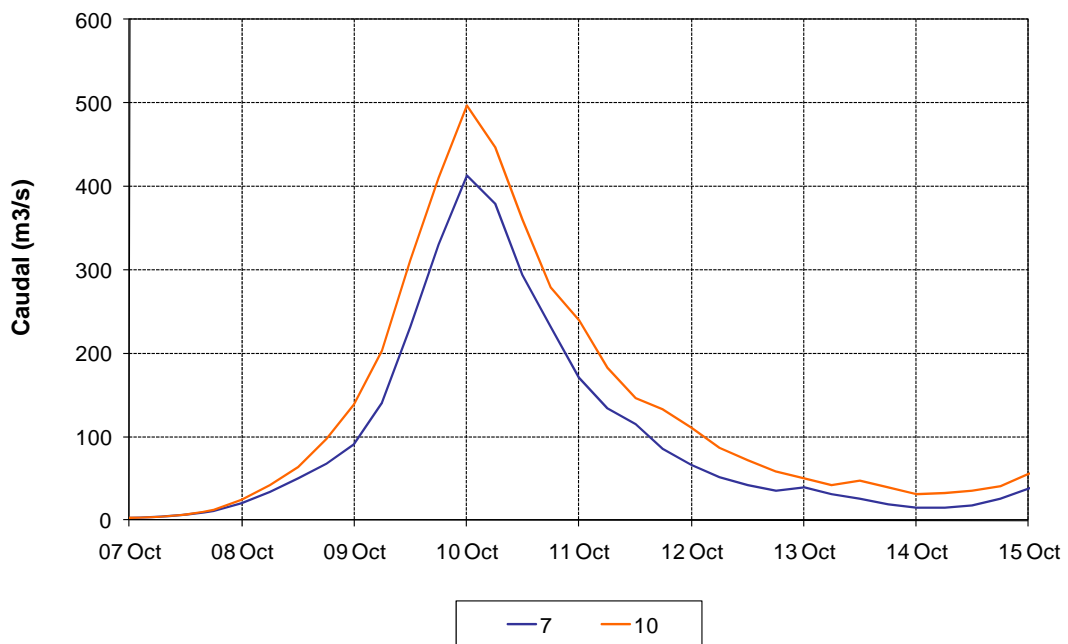


b) Niveles freático y piezométrico en 'Pozo 27'

Figura 3.2.10. Serie temporal de niveles freáticos y piezométricos para diferentes valores del Parámetro de Forma de la Curva de Conductividad Hidráulica.



a) Serie temporal

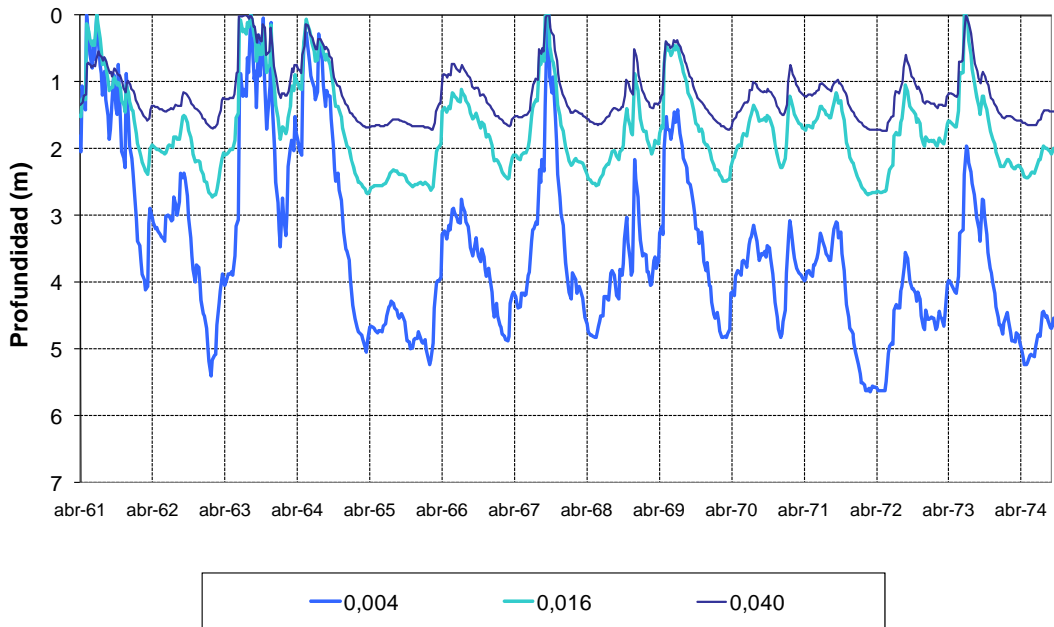


b) Evento de crecida de octubre de 1967

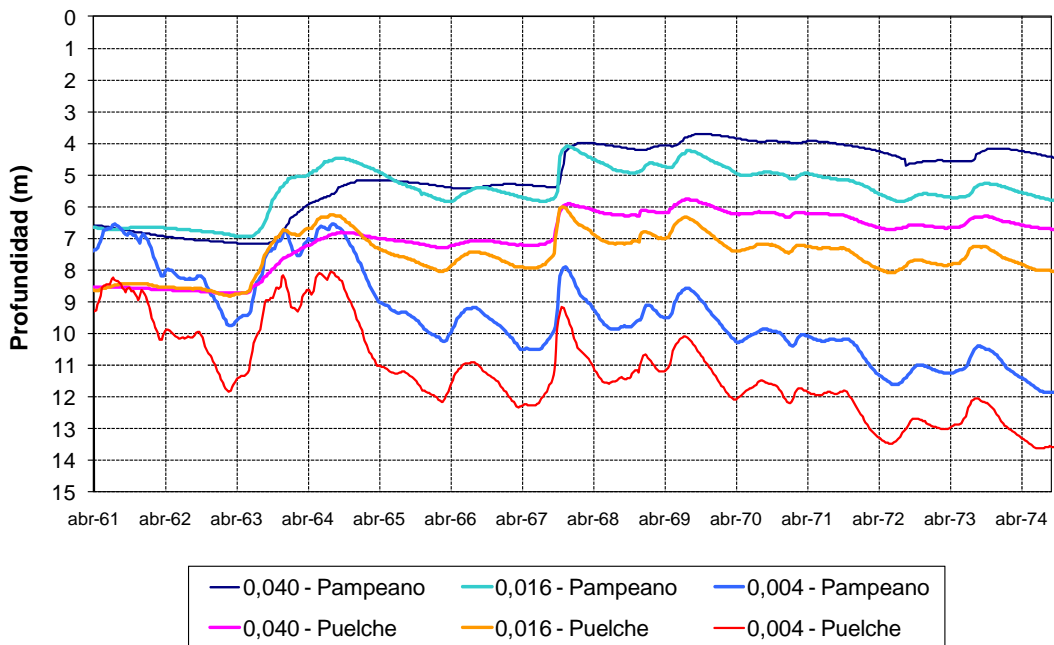
Figura 3.2.11. Caudal en Autopista Ricchieri para diferentes valores del Parámetro de Forma de la Curva de Conductividad Hidráulica.

En segundo lugar, se varió el Parámetro de Forma α de la Curva de Retención, originalmente establecido en 0,012 – que corresponde a un valor medio para limos –, a los valores extremos correspondientes a limo, a saber, un mínimo de 0,004 y un máximo de 0,040 (Schaap & Leij 2000). La Figura 3.2.12 muestra la relativamente alta sensibilidad de

los niveles freáticos y piezométricos, especialmente al disminuir el valor de α , que luego también se manifiesta tanto en el caudal base como en los caudales pico, como se ilustra en la Figura 3.2.13.

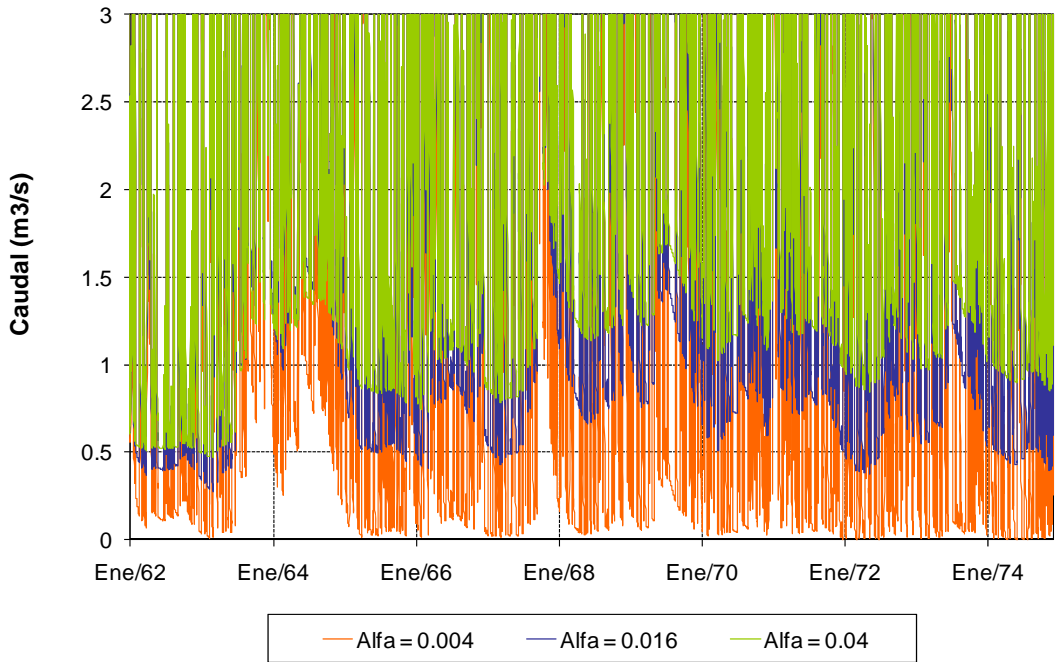


a) Nivel freático en 'Pozo 2'

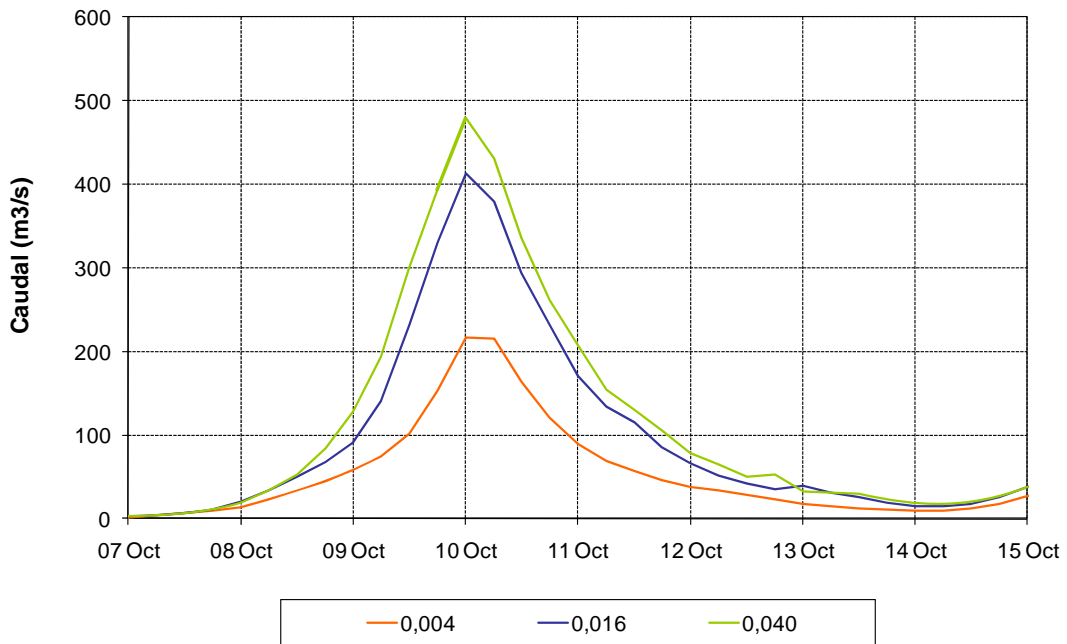


b) Nivel freático y freaticimético en 'Pozo 27'

Figura 3.2.12. Serie temporal de niveles freáticos y piezométricos para diferentes valores del Parámetro de Forma α de la Curva de Retención.



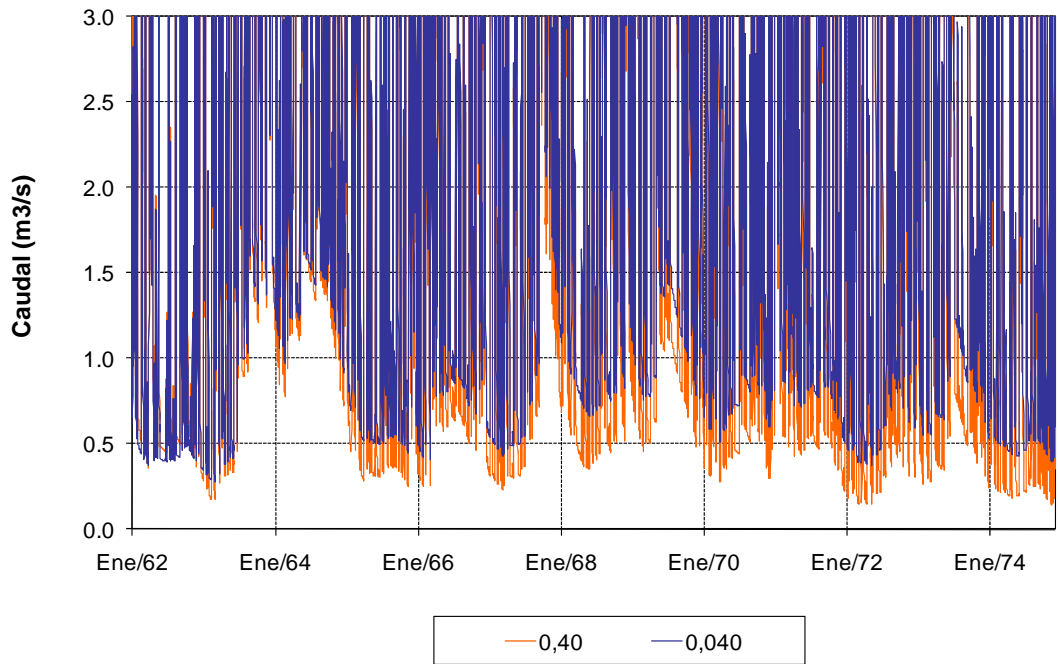
a) Serie temporal



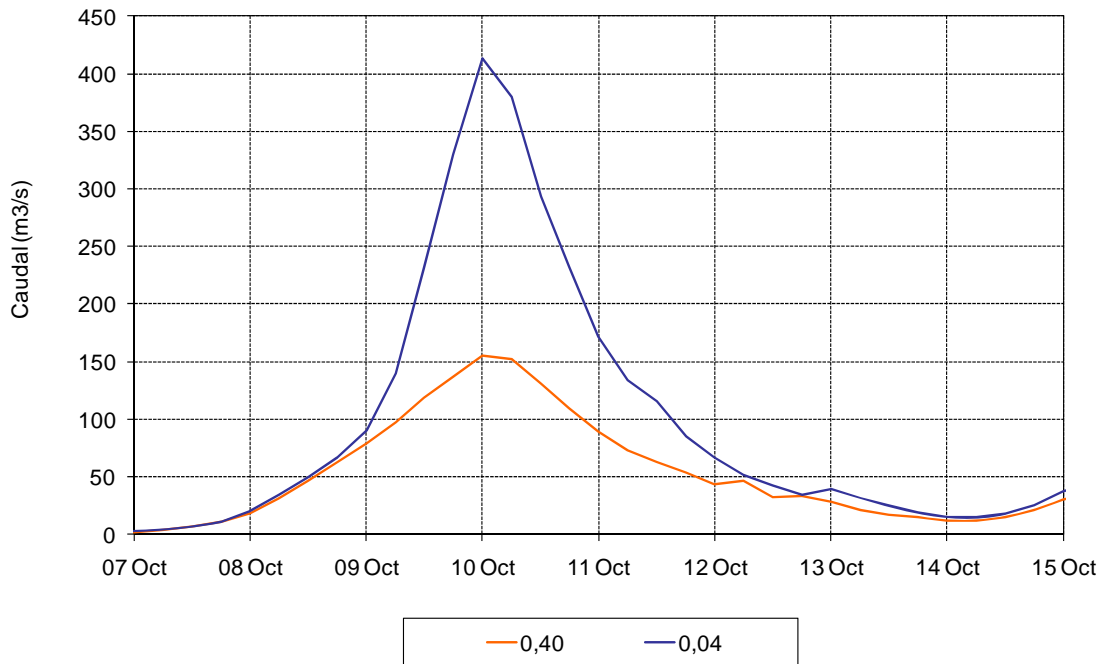
b) Evento de crecida de octubre de 1967

Figura 3.2.13. Caudal en Autopista Ricchieri para diferentes valores del Parámetro de Forma α de la Curva de Retención.

En tercer lugar, la conductividad saturada se varió en el rango 0,04/0,40 m/d. La Figura 3.2.14 ilustra la sensibilidad sobre los caudales base y pico, notándose una gran influencia sobre este último.



a) Serie temporal

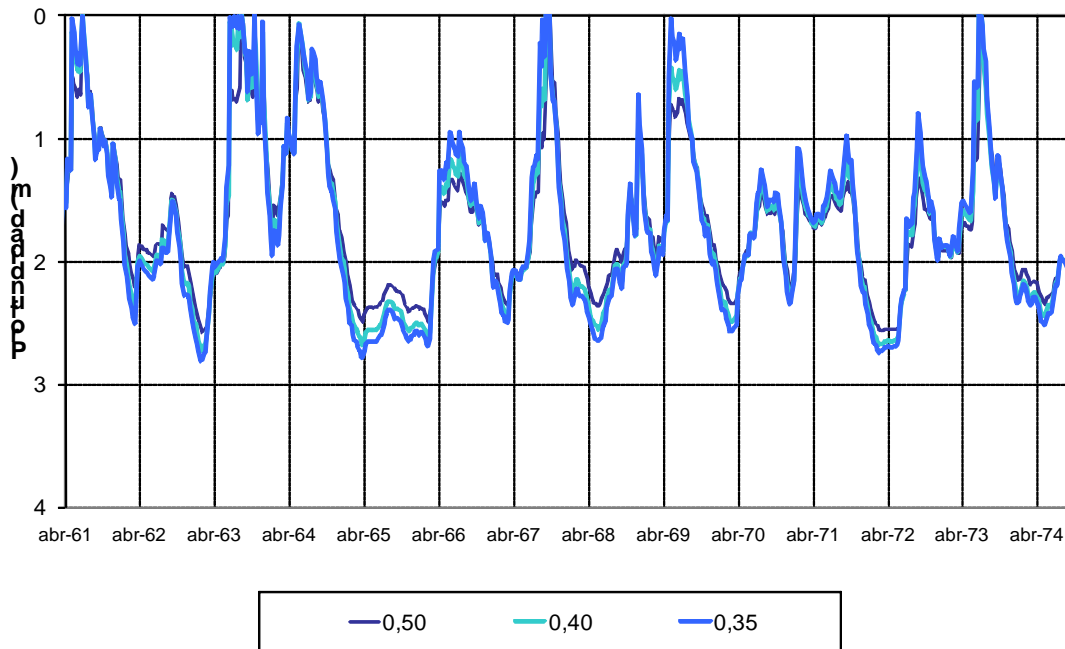


b) Evento de crecida de octubre de 1967

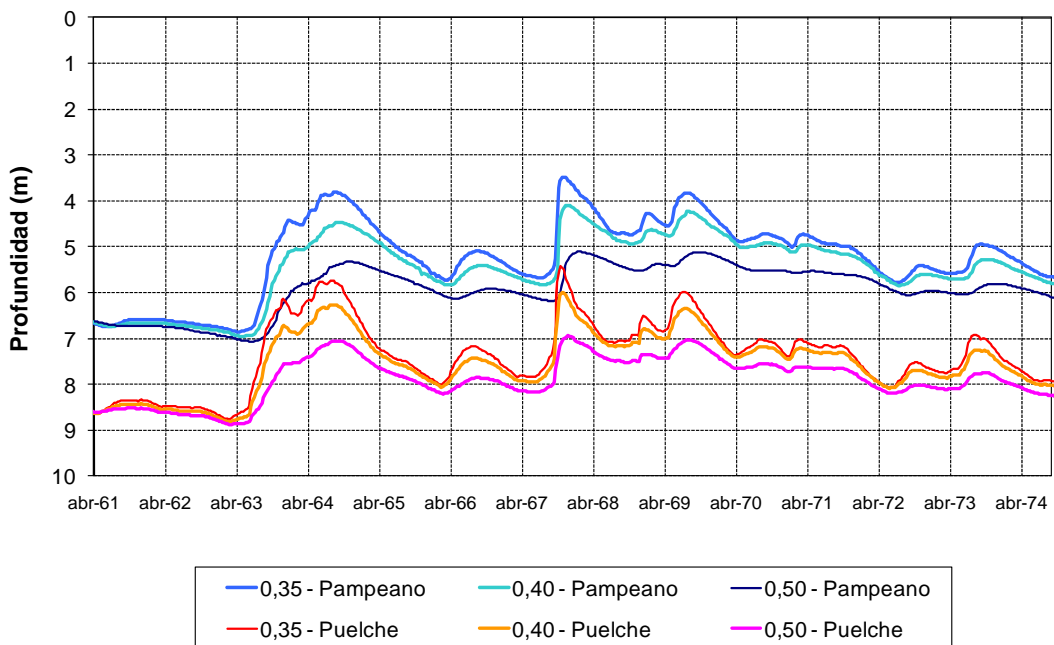
Figura 3.2.14. Caudal en Autopista Riccheri para diferentes valores de la Conductividad Saturada.

Contenido de humedad de saturación

En cuarto lugar, se varió la humedad de saturación dentro del rango 0,30/0,50. Las Figuras 3.2.15 y 3.2.16 muestran la relativamente baja sensibilidad de los niveles de agua subterránea y del caudal, respectivamente.

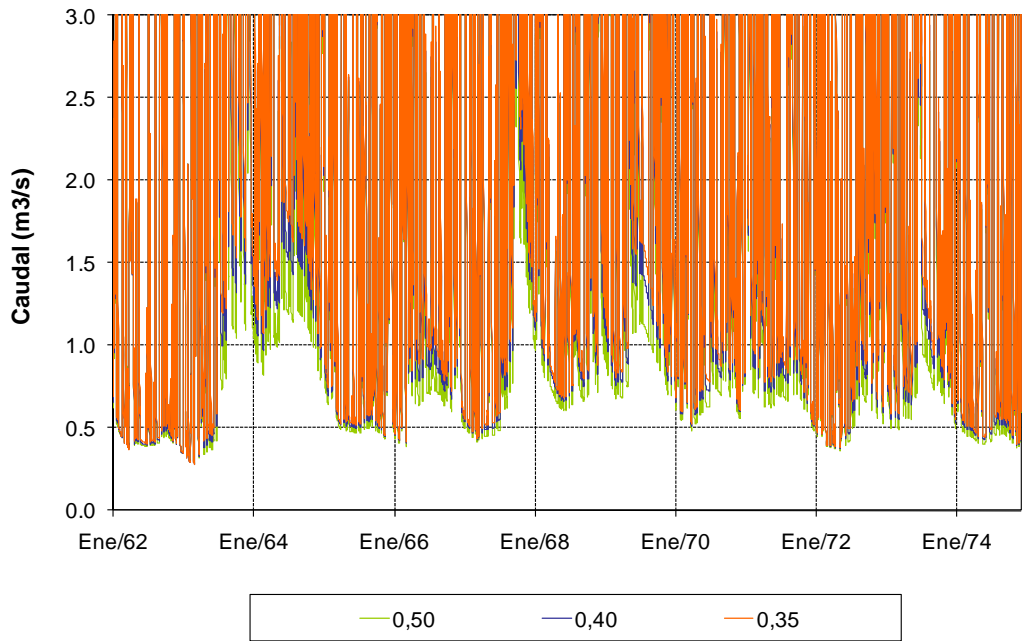


a) Nivel freático en 'Pozo 2'

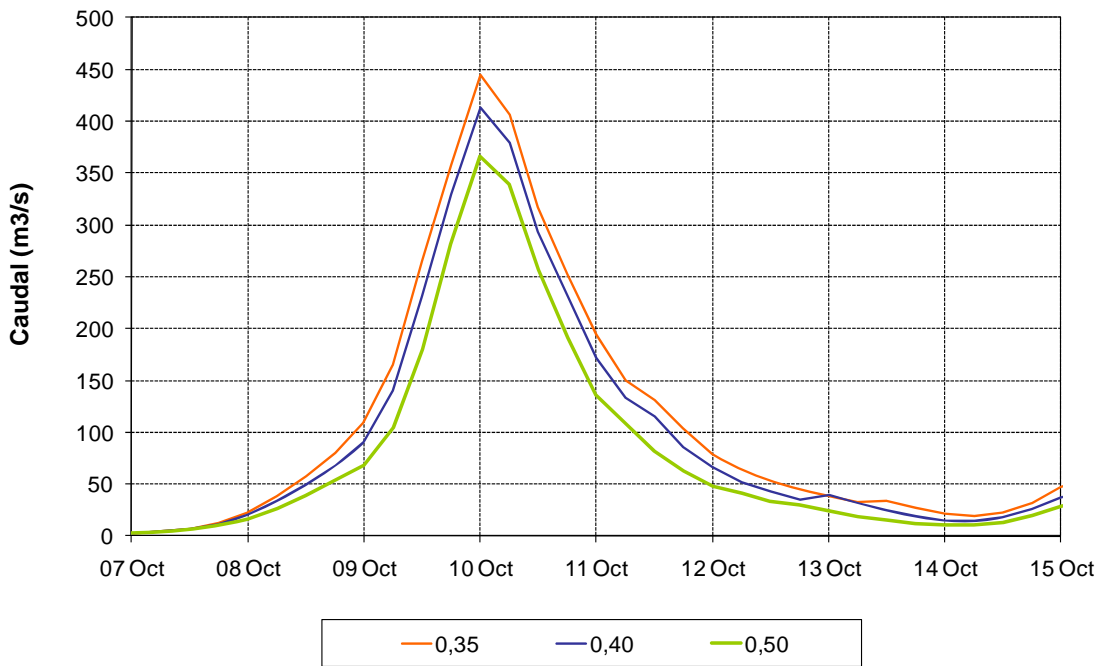


b) Niveles freático y piezométrico en 'Pozo 27'

Figura 3.2.15. Serie temporal de niveles freáticos y piezométricos para diferentes valores de la Humedad de Saturación.



a) Serie temporal



b) Evento de crecida de octubre de 1967

Figura 3.2.16. Caudal en Autopista Ricchieri para diferentes valores de la Humedad de Saturación.

3.3 Calibración

Para calibrar el modelo de aguas subterráneas se ajustaron los valores de permeabilidad de los estratos (Tabla 3.4.1) y algunos parámetros de la zona no saturada, a saber, para la Curva de Retención, Parámetro de Forma $\alpha = 0,016$; para la Curva de Conductividad Hidráulica, Humedad de Saturación = 0,40 y Conductividad Saturada = 0,4 m/d. El coeficiente de evapotranspiración F (que contempla la evapotranspiración que ocurre en las zonas impermeables) se fijó en el valor $F = 0.30$. A continuación se muestran los acuerdos alcanzados entre mediciones y modelo para las variables subterráneas, considerados globalmente como satisfactorios.

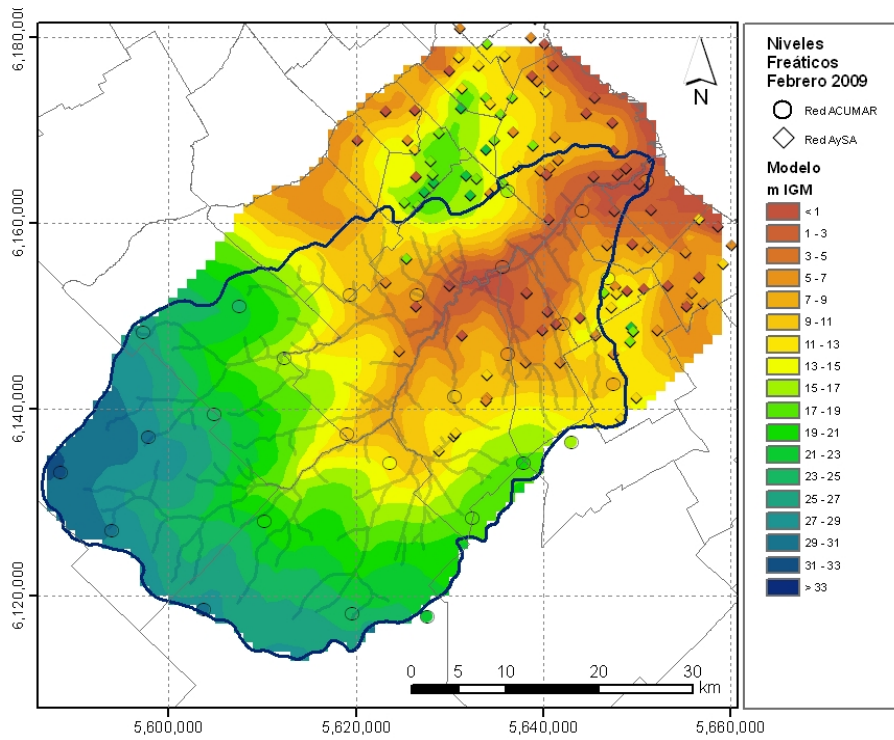
Tabla 3.4.1. Permeabilidades adoptadas para los distintos estratos (entre paréntesis se indican los valores asignados originalmente)

Estrato	Permeabilidad horizontal (m/d)	Permeabilidad vertical (m/d)
<i>Pampeano</i>	1 (1)	10 (5)
<i>Acuitardo</i>	0,0005 (0,0050)	0,0005 (0,0050)
<i>Puelche</i>	10 (2)	120 (20)

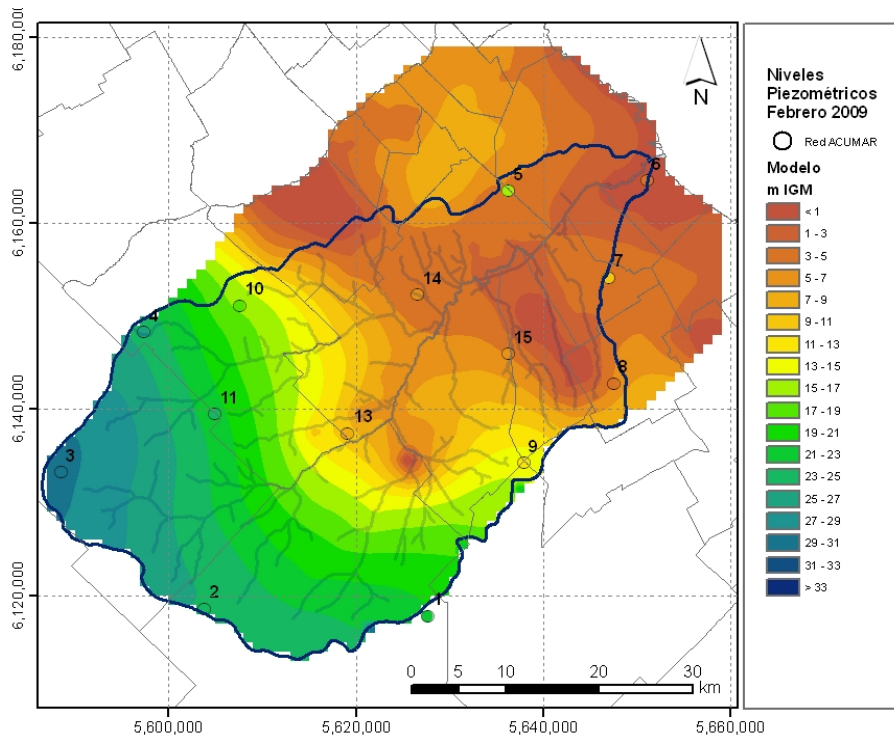
En la Figura 3.4.1 se presenta la comparación entre, por un lado, los niveles freáticos y piezométricos medidos en la red de pozos de monitoreo de la ACuMaR y los niveles freáticos de la red de AySA, y, por el otro, los niveles provistos por el modelo. La comparación corresponde al mes de febrero de 2009. El nivel piezométrico medido en el 'Pozo 5' en principio no se considera representativo, estimándose que existe alguna falla que lo equipara al nivel freático.

Como complemento, se presentan distribuciones en cortes longitudinales y transversales siguiendo los pozos de monitoreo. Los datos de mediciones de la red ACuMaR corresponden a la semana que se extiende entre el 18 y el 26 de noviembre de 2008. Se comparan con resultados del modelo para el día 25 de noviembre. En la Figura 3.4.2 se indican las trazas de los cortes longitudinales; la comparación correspondiente se muestra en la Figura 3.4.3. Por su parte, la Figura 3.4.4 presenta las trazas de los cortes transversales, y los resultados correspondientes se muestran en la Figura 3.4.5.

La Figura 3.4.6 muestra la ubicación de los pozos de la red ACuMaR para los cuales, en la Figura 3.4.7, se presenta la comparación entre las series temporales de niveles calculadas con el modelo y las que surgen de las mediciones (que sólo abarcan la última parte del período de tiempo simulado).



a) Nivel freático



b) Nivel piezométrico

Figura 3.4.1. Comparación de distribuciones en planta de niveles freático y piezométrico para febrero de 2009.

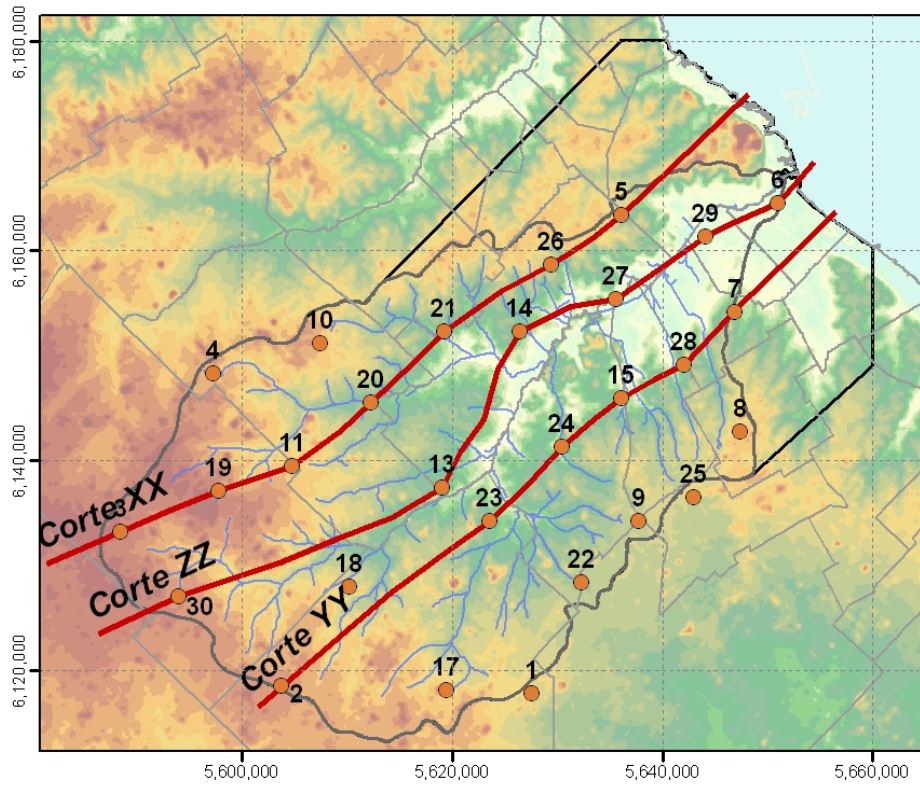
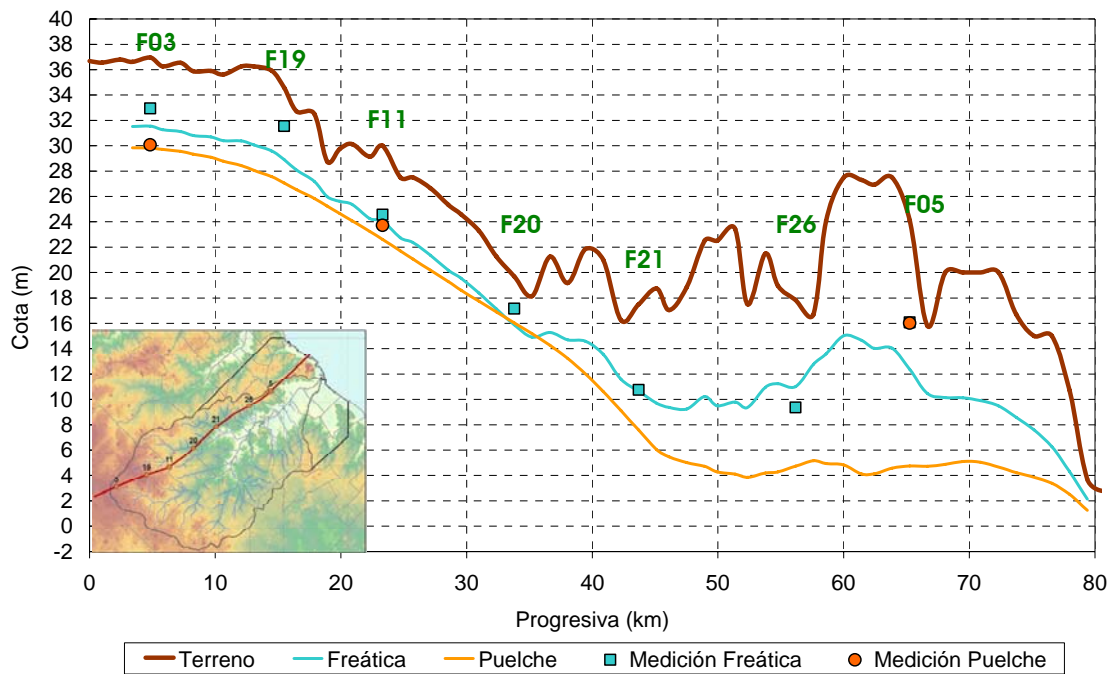
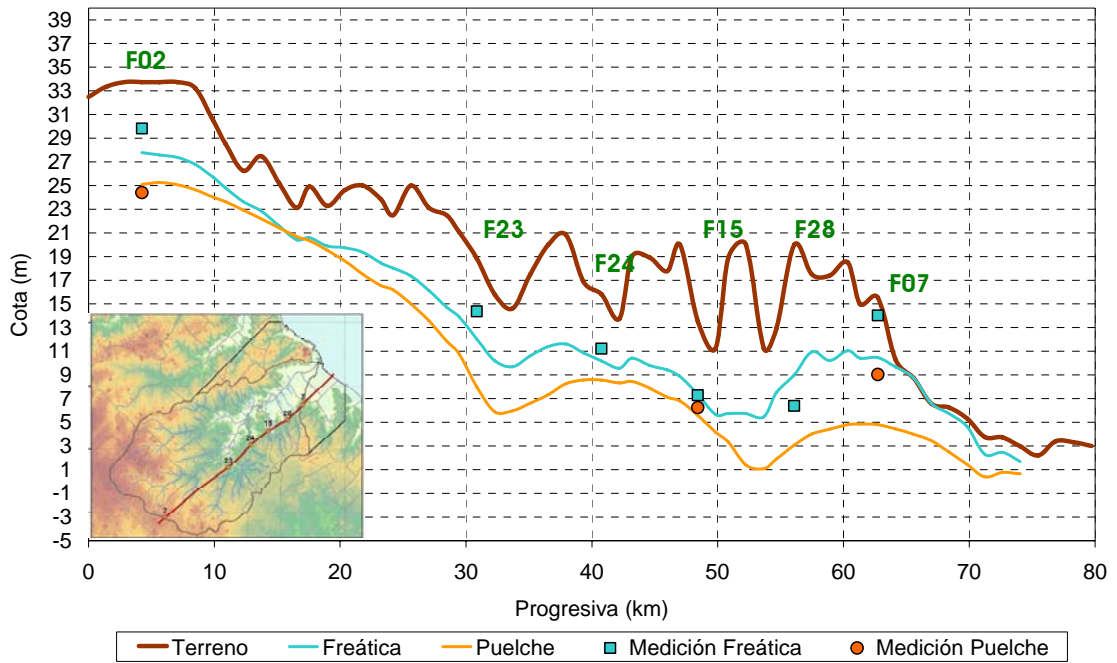


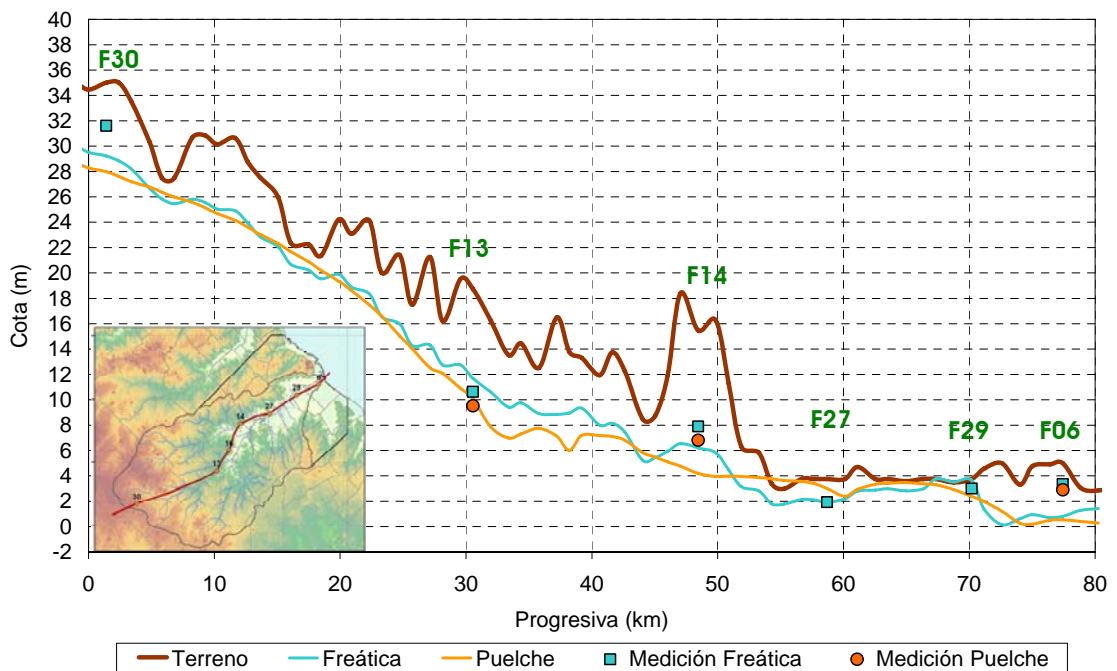
Figura 3.4.2. Cortes longitudinales siguiendo los pozos de monitoreo de la ACuMaR.



a) Corte XX



b) Corte YY



c) Corte ZZ

Figura 3.4.3. Comparación de distribuciones longitudinales de niveles freático y piezométrico para noviembre de 2008.

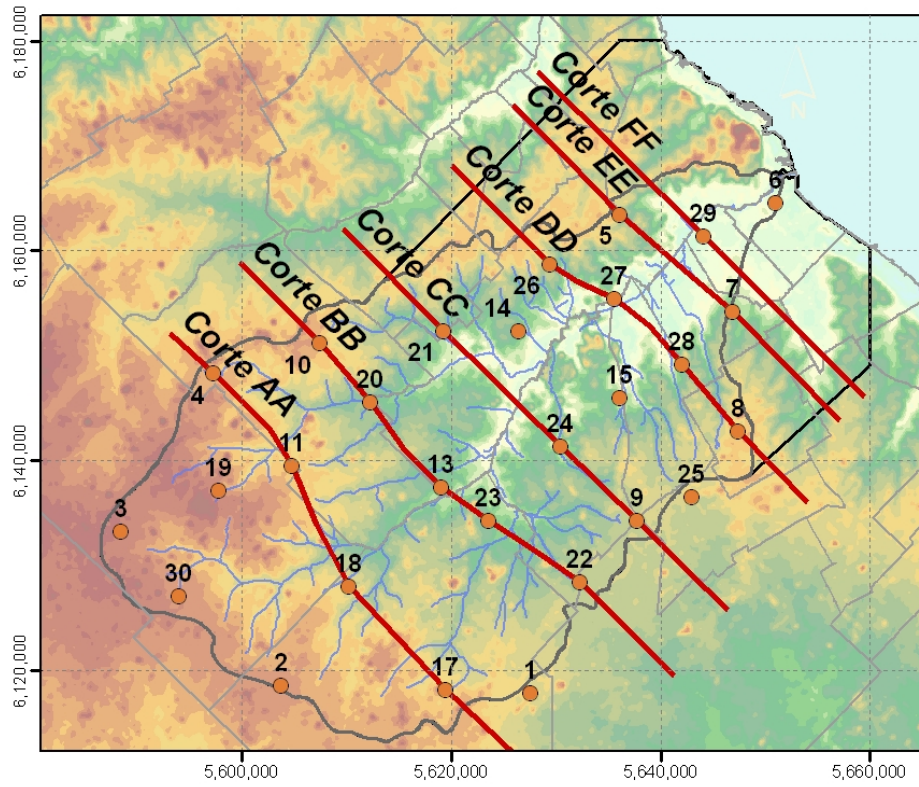
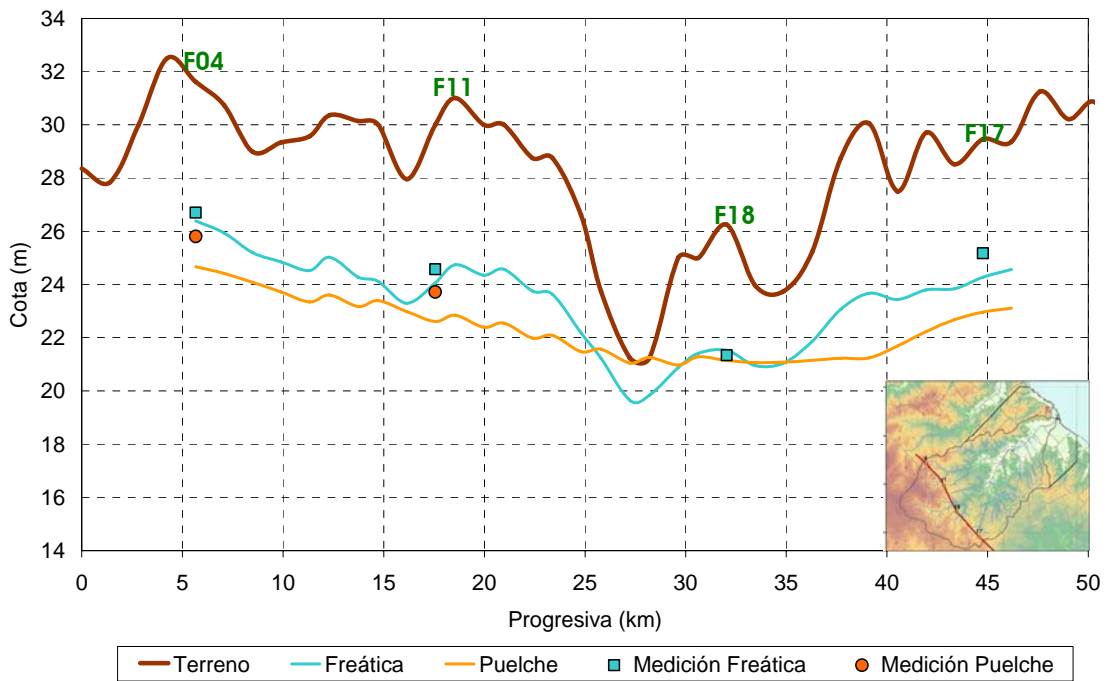
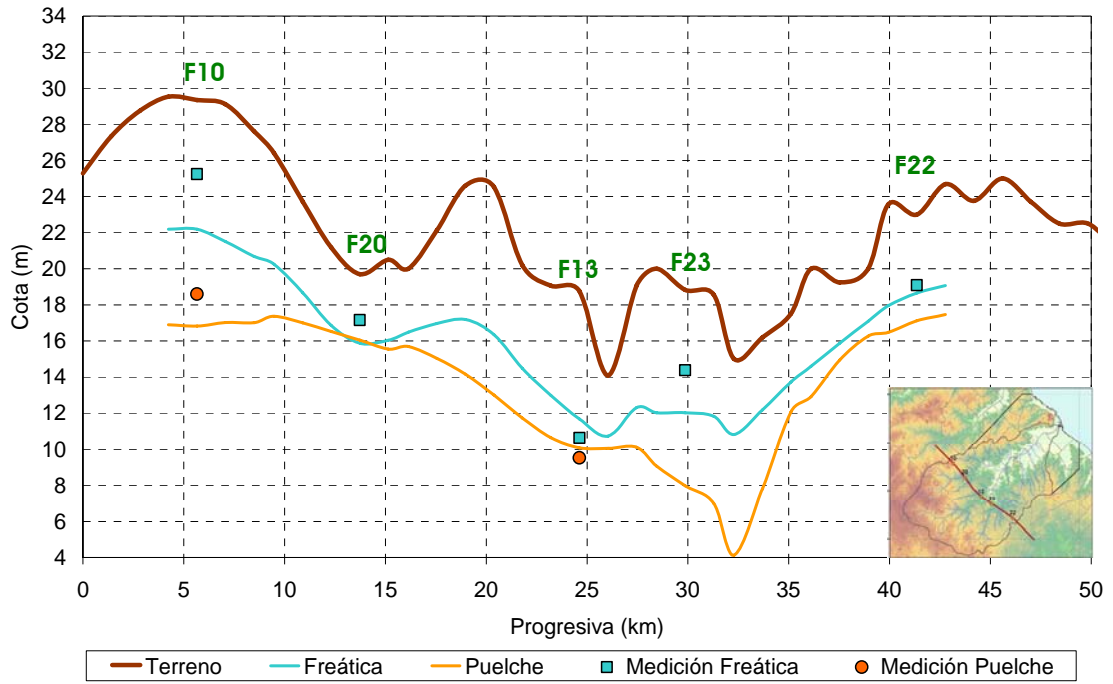


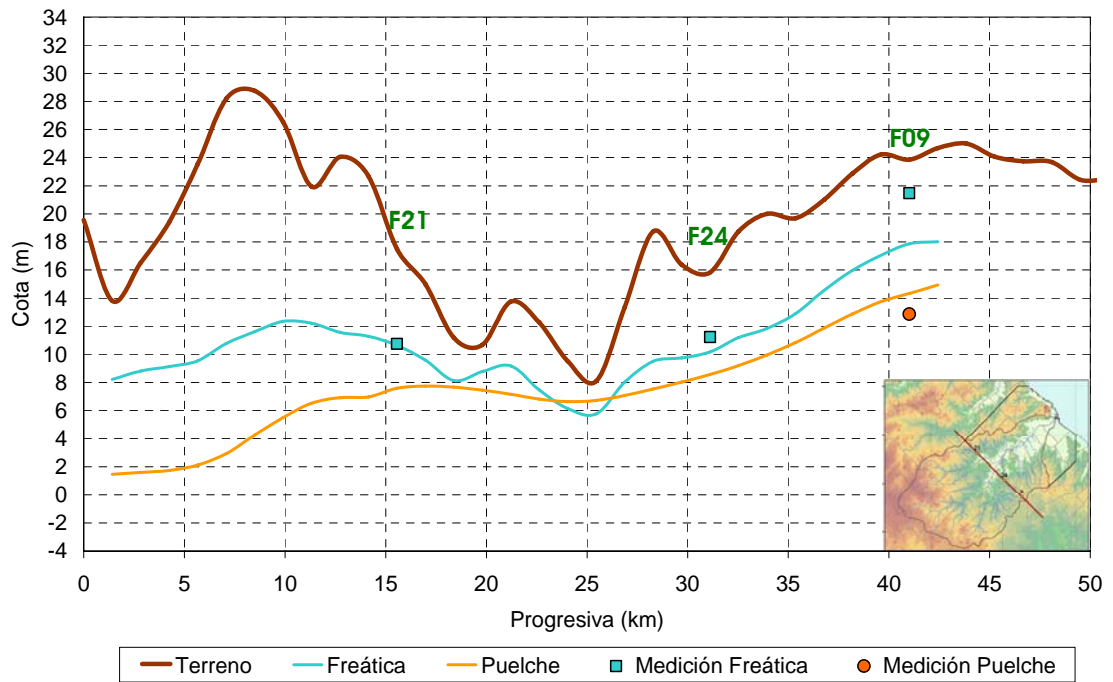
Figura 3.4.4. Cortes transversales siguiendo los pozos de monitoreo de la ACuMaR.



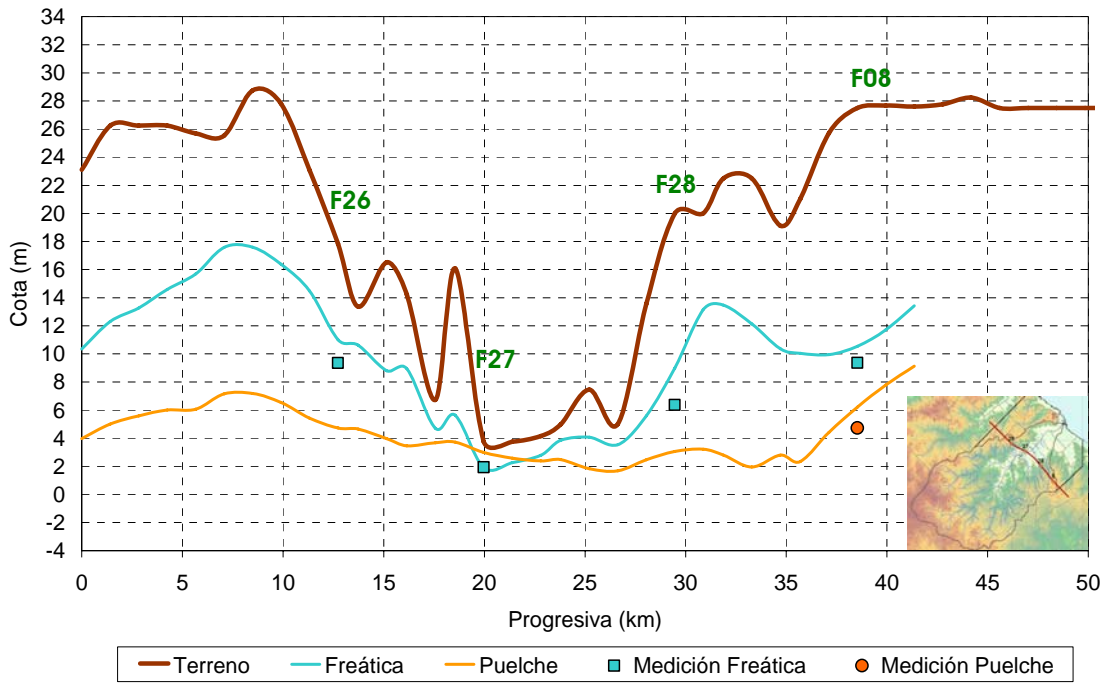
a) Corte AA



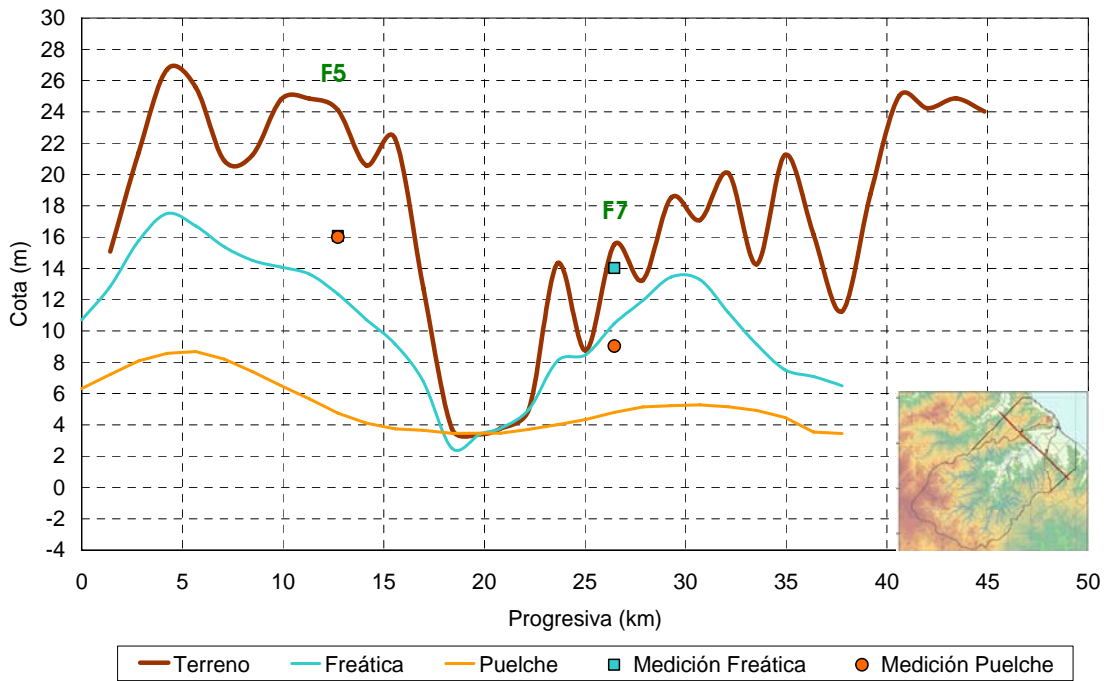
b) Corte BB



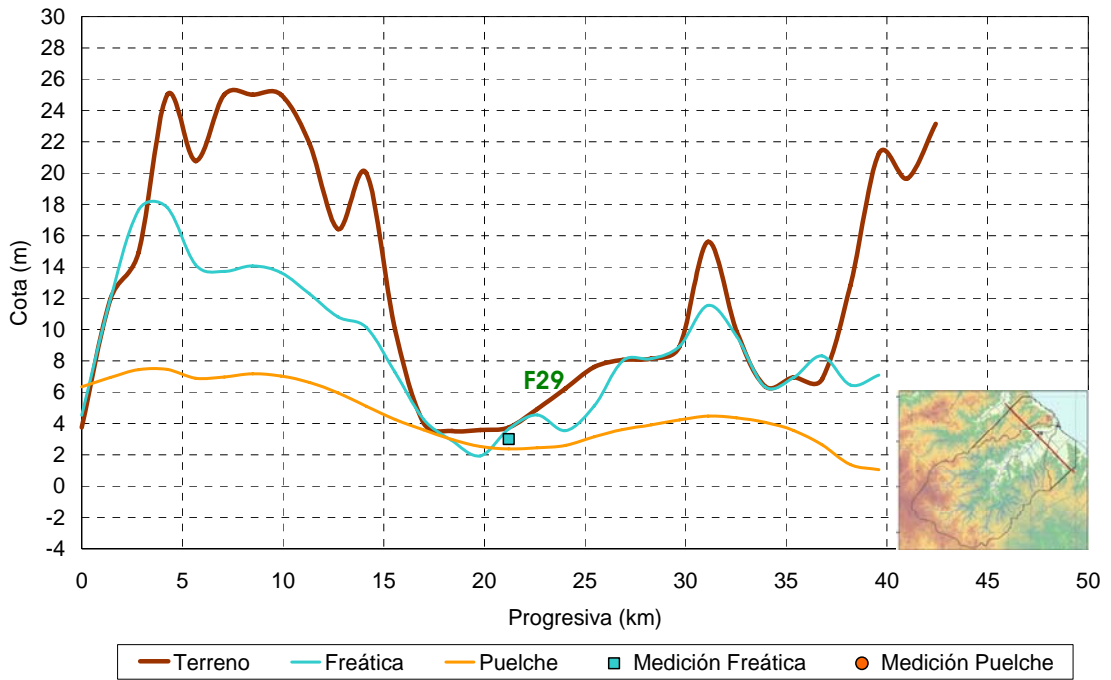
c) Corte CC



d) Corte DD



e) Corte EE



f) Corte FF

Figura 3.4.5. Distribuciones transversales de niveles freático y piezométrico para noviembre de 2008.

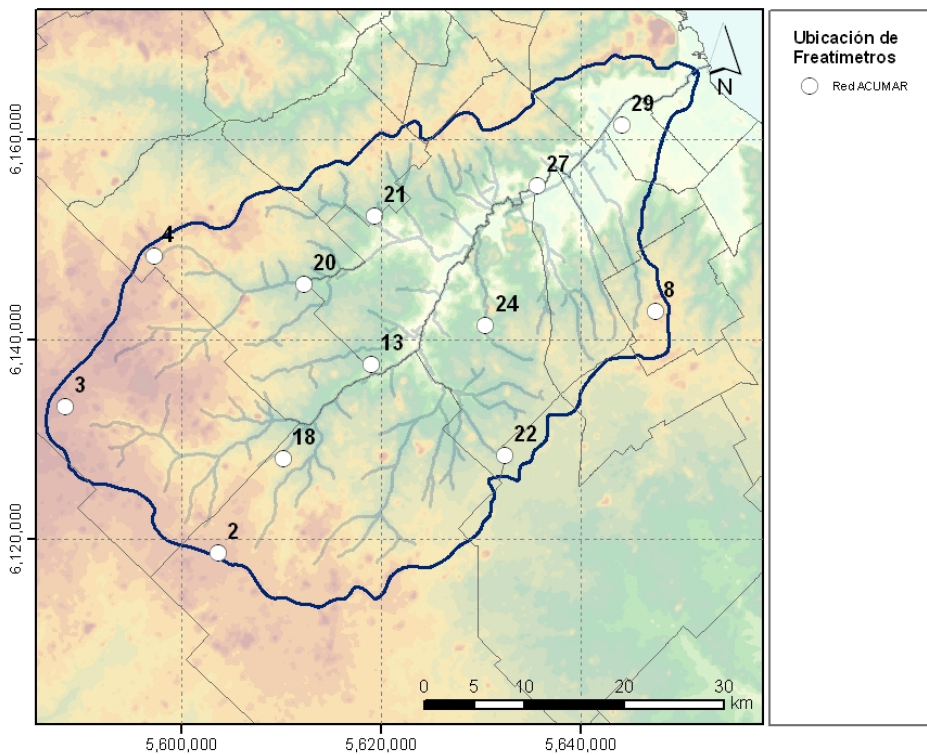
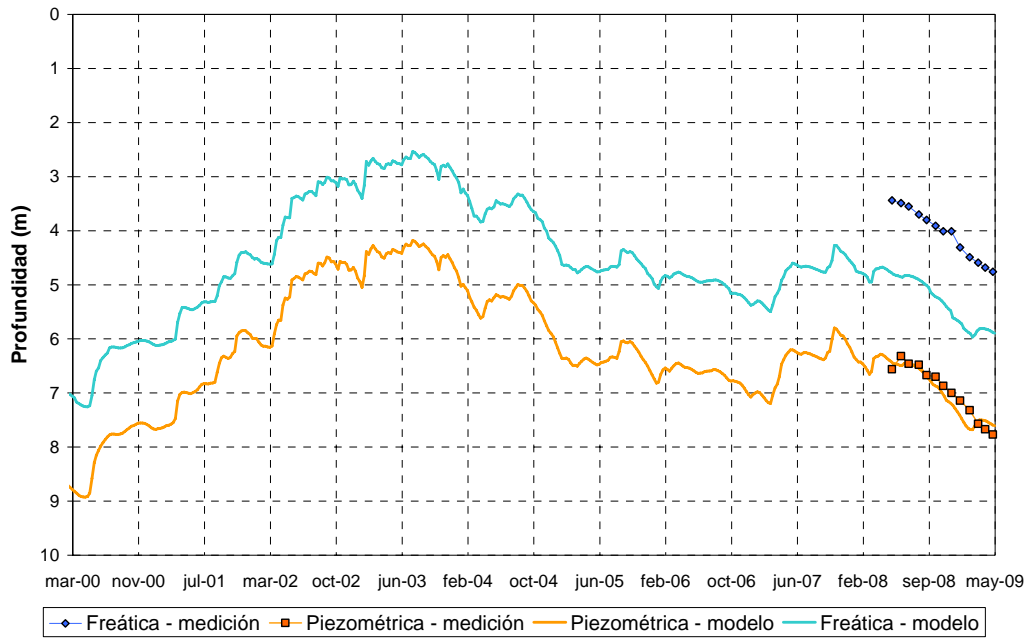
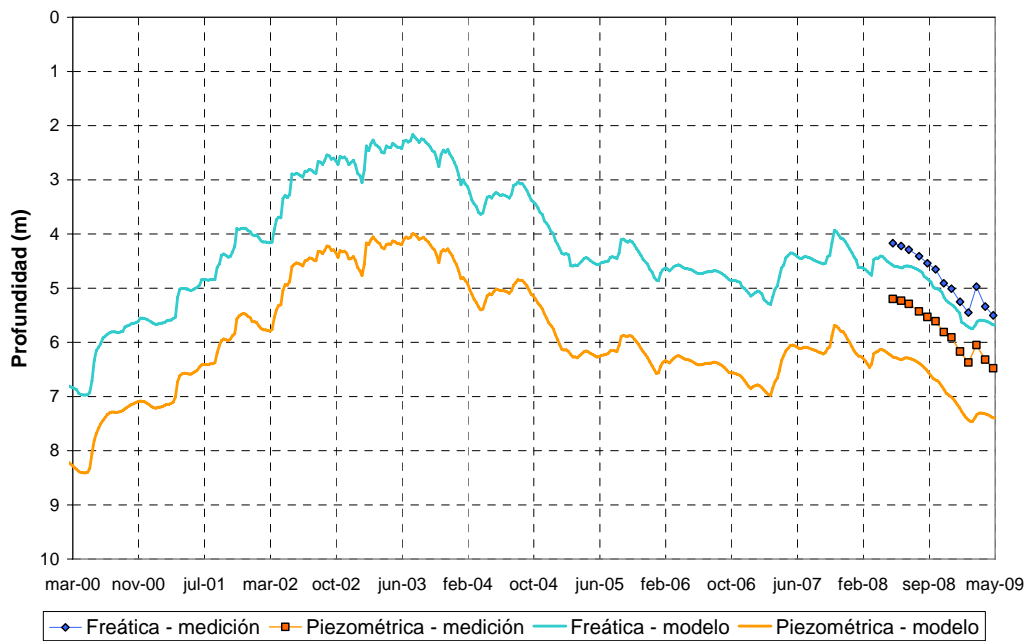


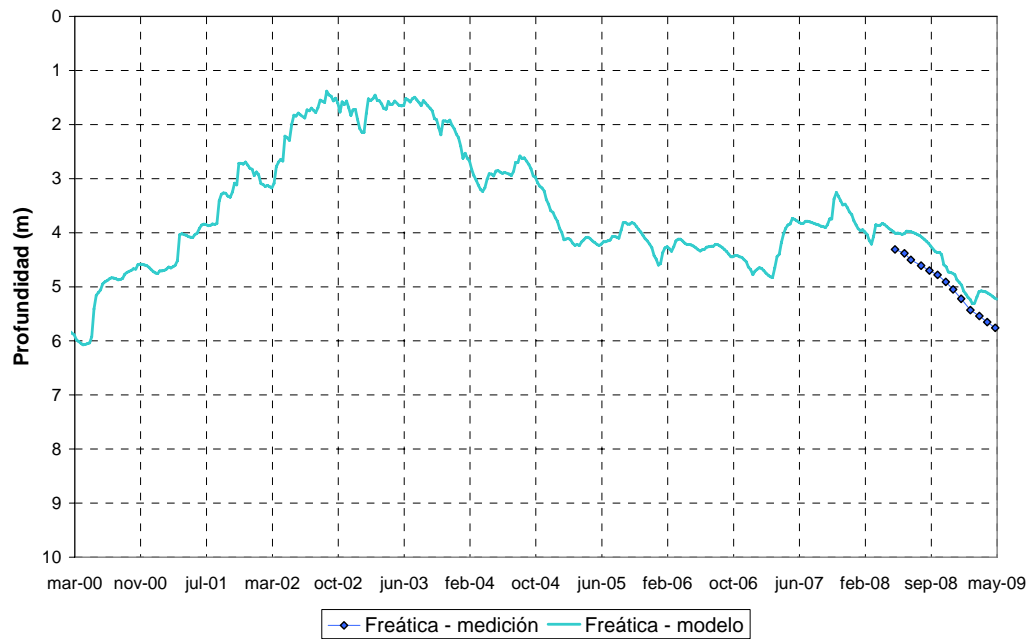
Figura 3.4.6. Ubicación de pozos de medición seleccionados



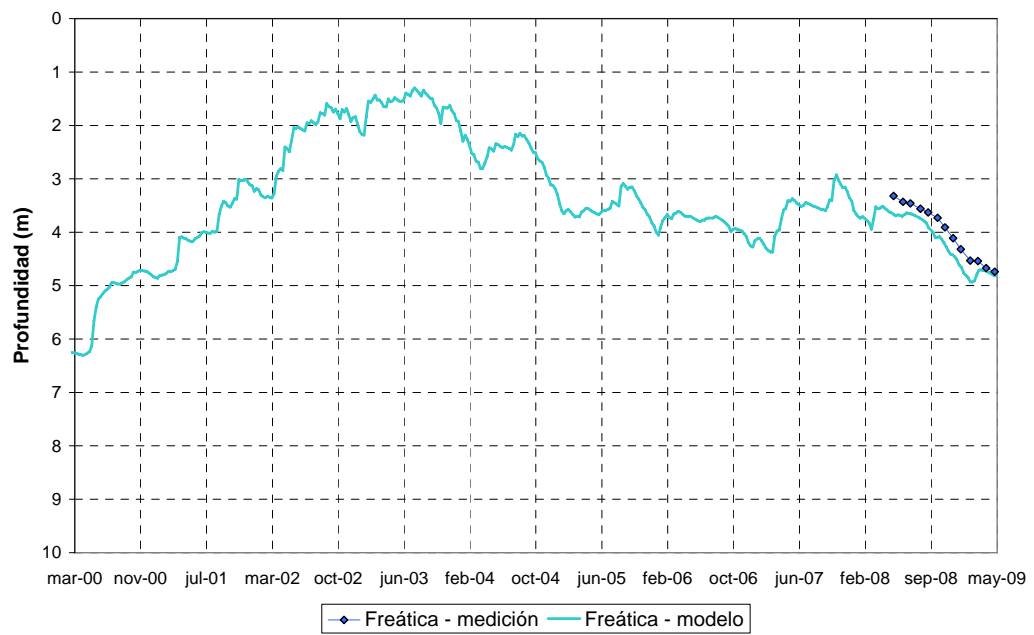
a) Pozo 3



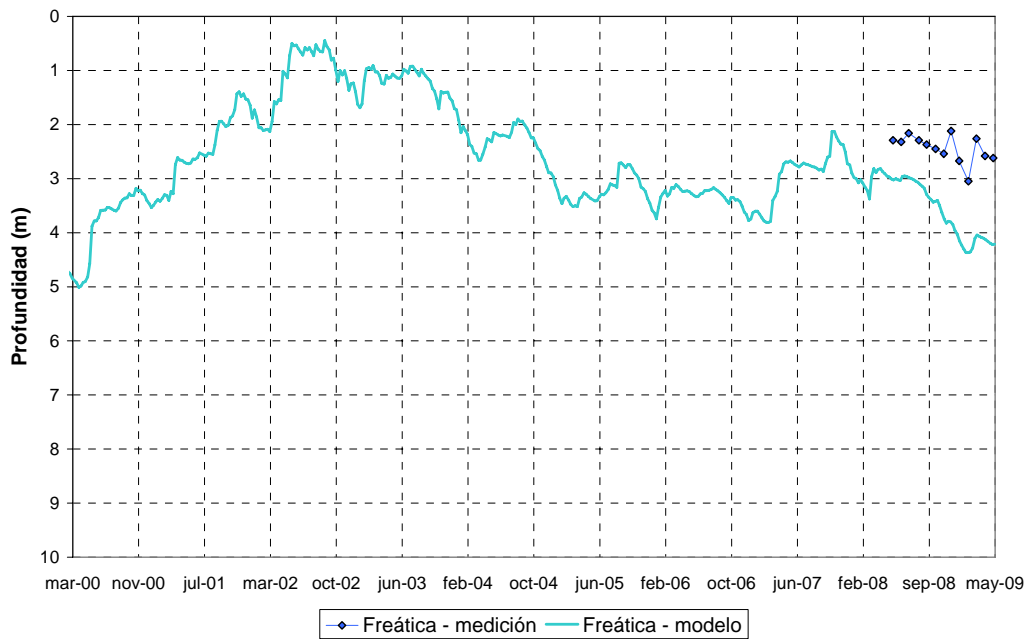
b) Pozo 4



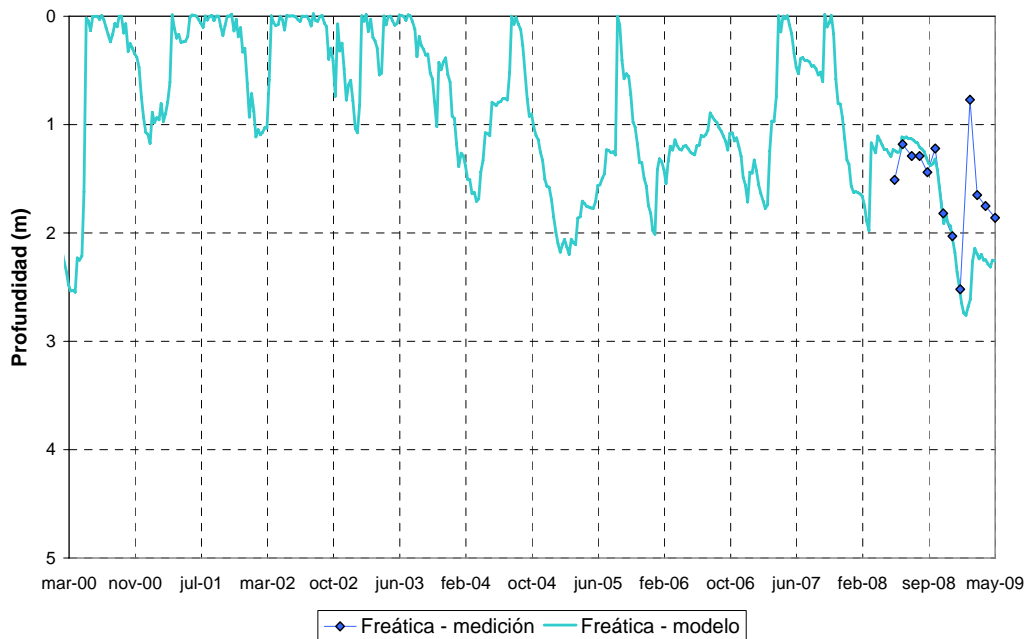
c) Pozo 18



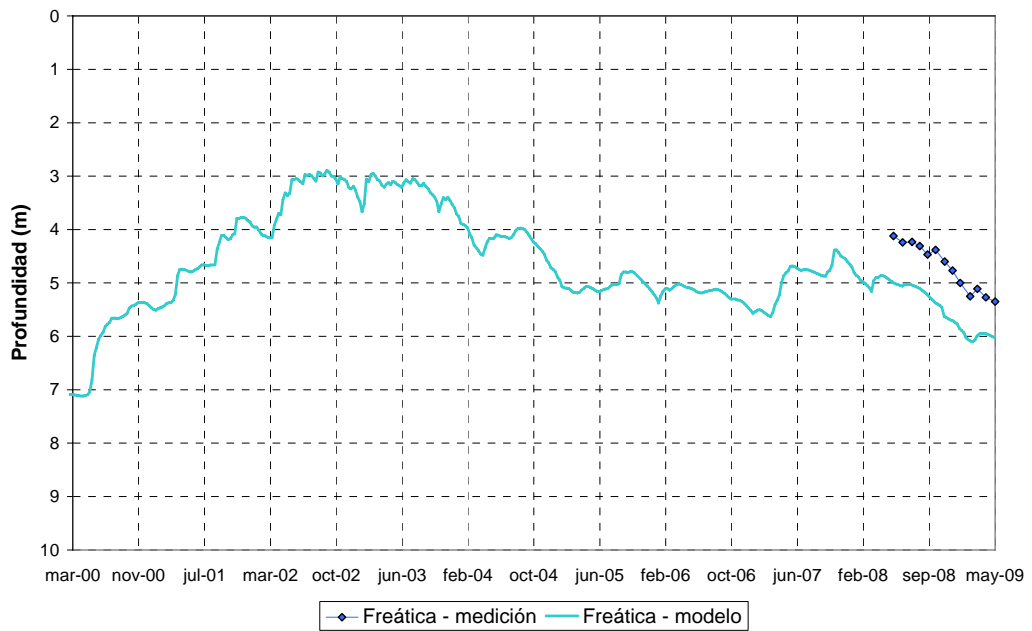
d) Pozo 22



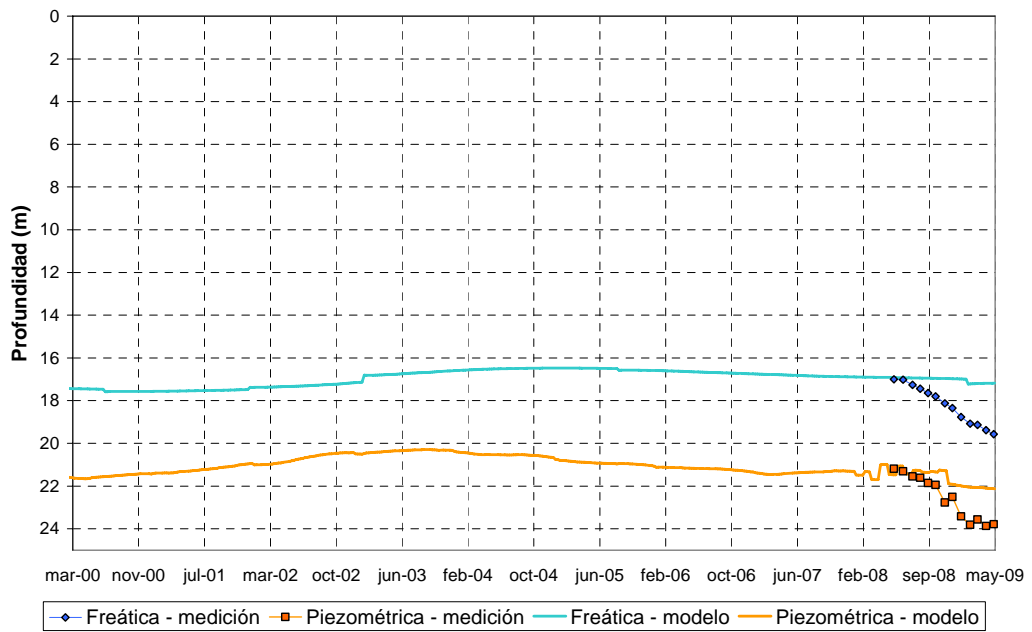
e) Pozo 20



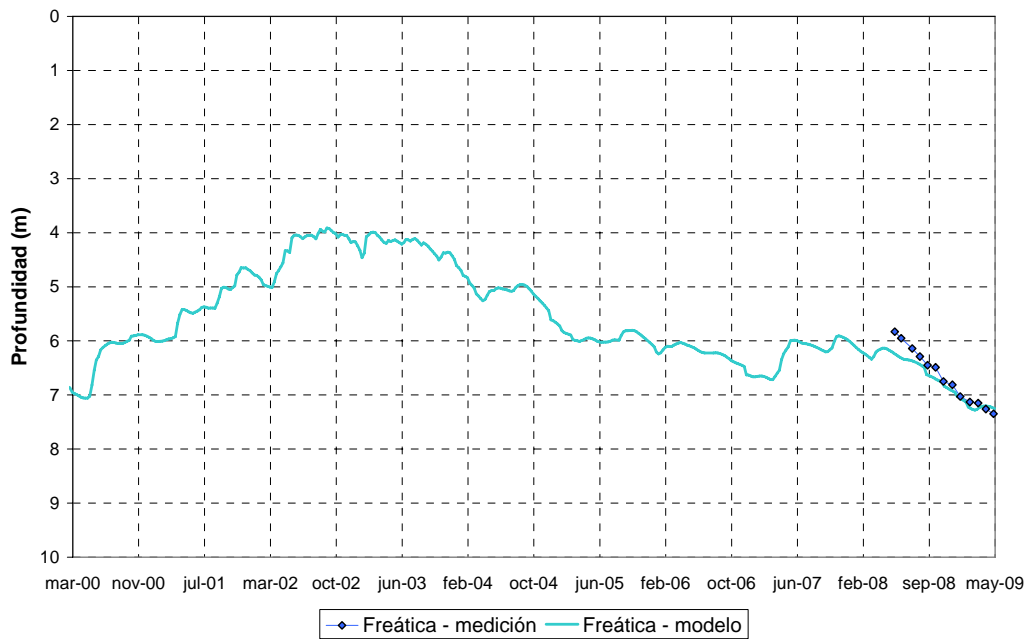
f) Pozo 27



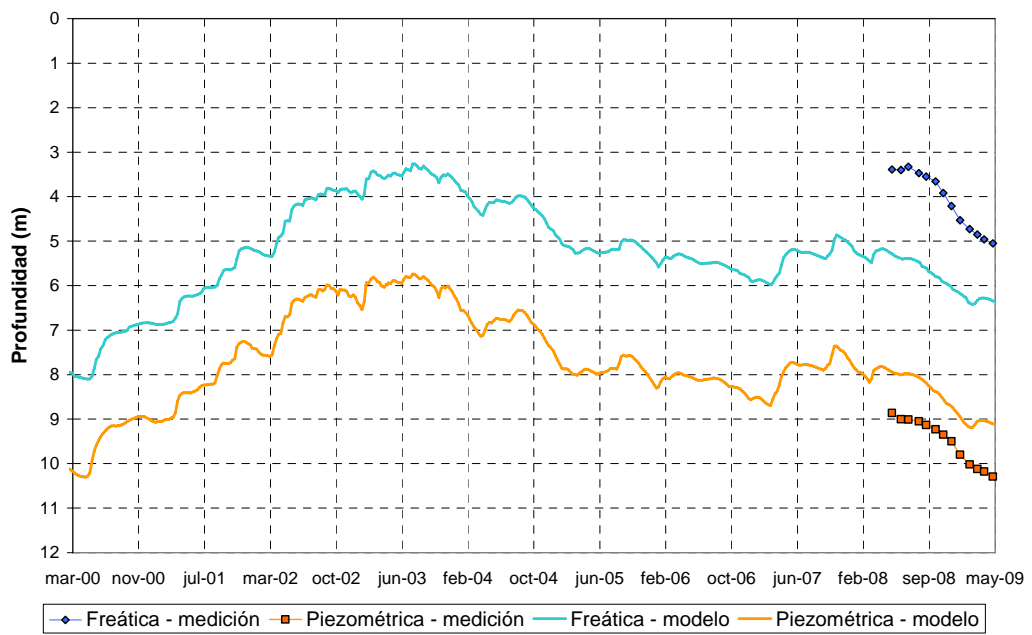
g) Pozo 24



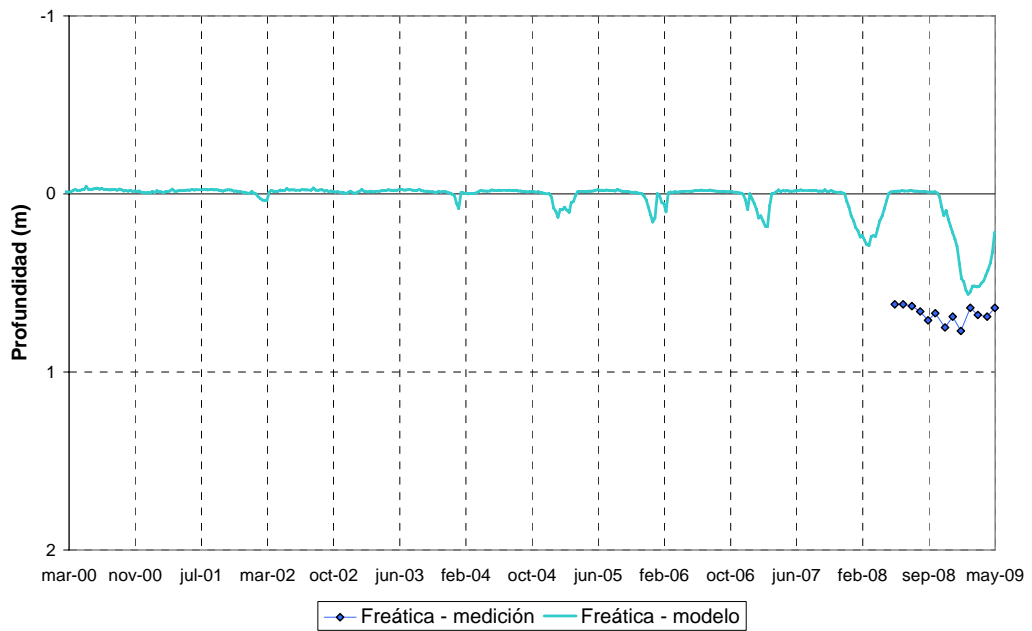
h) Pozo 8



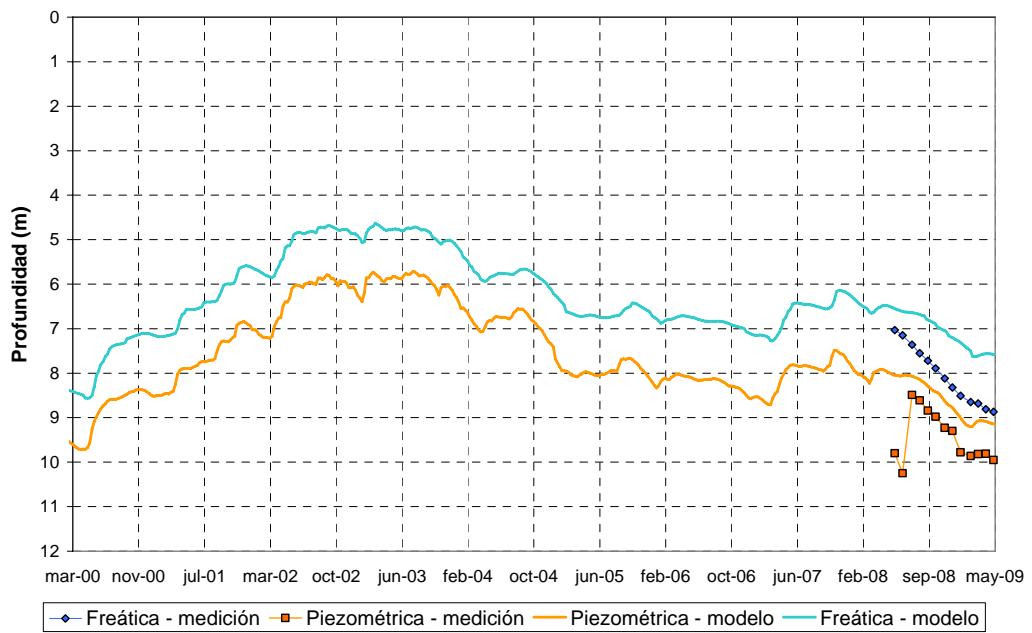
i) Pozo 21



j) Pozo 2



k) Pozo 29



l) Pozo 13

Figura 3.4.7. Series temporales de niveles en pozos de la red de ACuMaR

4 EXPLOTACIÓN DEL MODELO

4.1 Cuenca natural

Utilizando el modelo es posible simular la evolución hidrológica de la cuenca si ésta hubiera permanecido en condiciones naturales, es decir, sin intervenciones antrópicas.

Se dispuso de series de observaciones de variables climáticas y de precipitación para las dos estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicadas dentro de la zona de estudio¹⁴. Para la estación de observación de Villa Ortúzar, en la ciudad de Buenos Aires, se contó con una serie de variables climáticas desde abril de 1956 hasta la actualidad, y de precipitaciones desde enero de 1906 hasta la actualidad. Para la estación de observación correspondiente al Aeropuerto Internacional de Ezeiza se dispuso de una serie de variables climáticas desde febrero de 1956 hasta la actualidad, y de precipitaciones desde febrero de 1959 hasta la actualidad.

Se efectuó una simulación a lo largo de prácticamente un siglo, para el período 1906 – 2009. La serie de precipitaciones de Ezeiza se completó hacia atrás con la serie de Buenos Aires, utilizando la curva de correlación construida en base a las observaciones del período 1960-2009 (Figura 4.1.1). Las series de evapotranspiración potencial para el período 1956 – 2009 fueron calculadas mediante la metodología de Penman. Se observó una alta correlación para las dos estaciones (Figura 4.1.2). Teniendo en cuenta la relativamente escasa variación anual, estas series se completaron hacia atrás repitiendo los valores que se produjeron 50 años después (por ejemplo, para el año 1906 se utilizó el año 1956).

¹⁴ Estos datos fueron provistos por el SMN

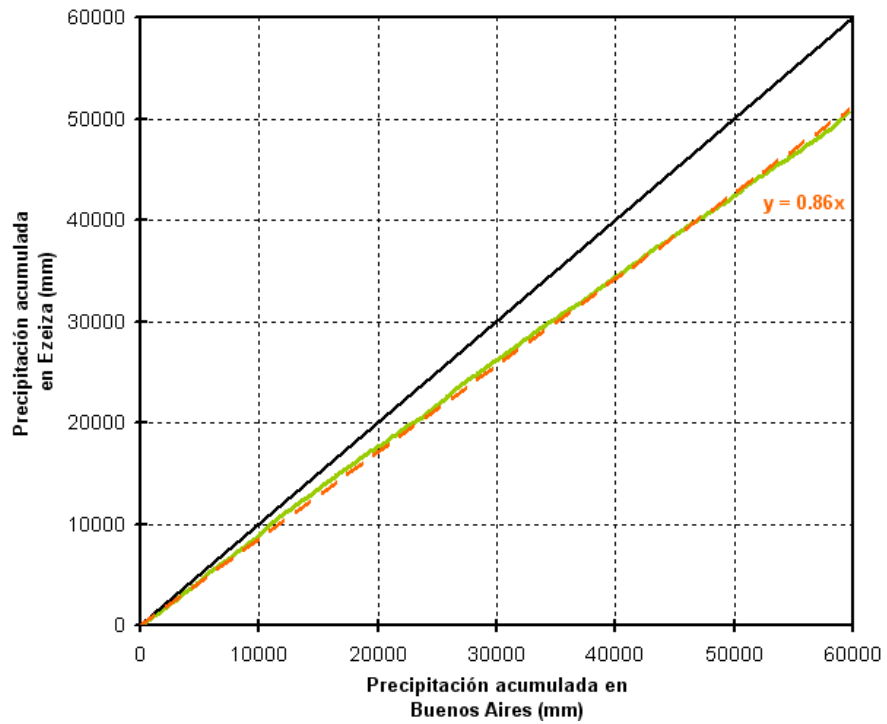


Figura 4.1.1. Correlación de precipitaciones entre las estaciones Ezeiza y Villa Ortúzar para el período 1960-2009

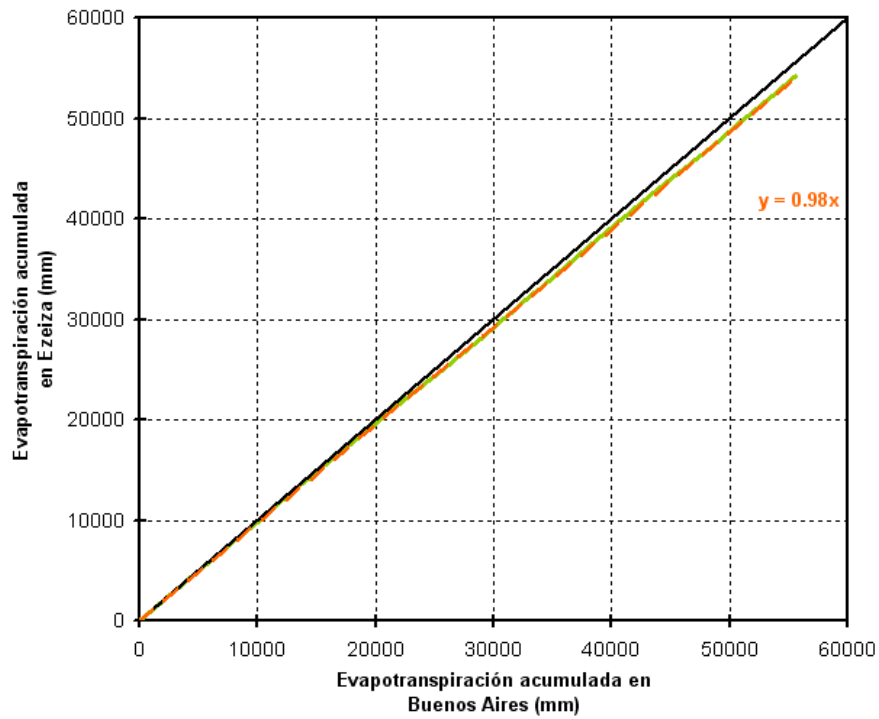
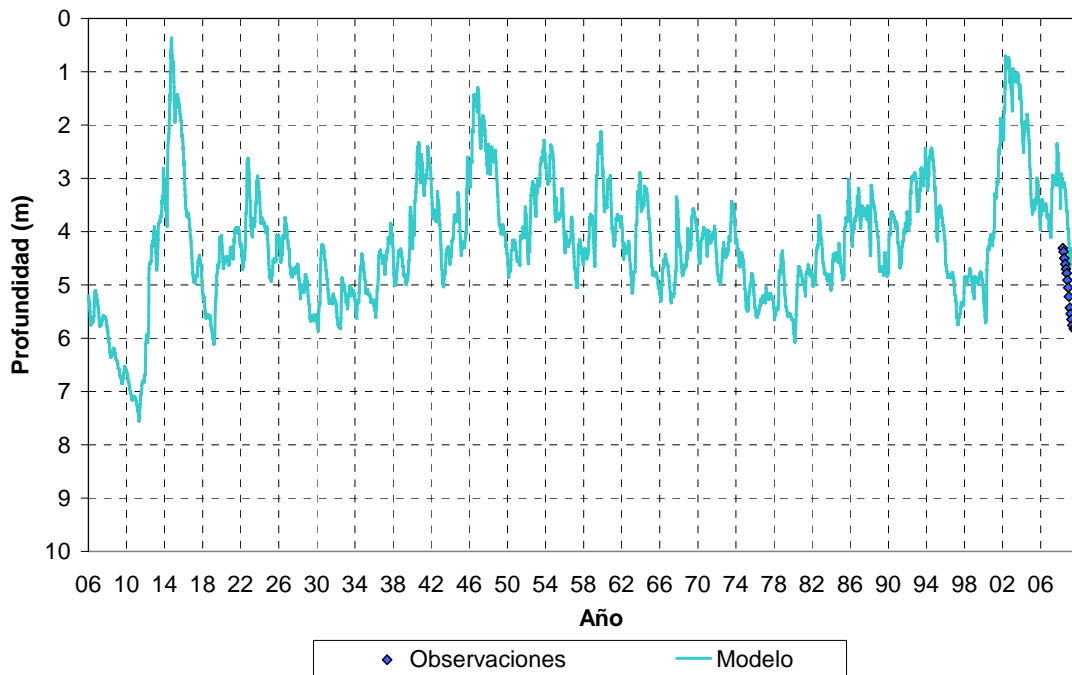


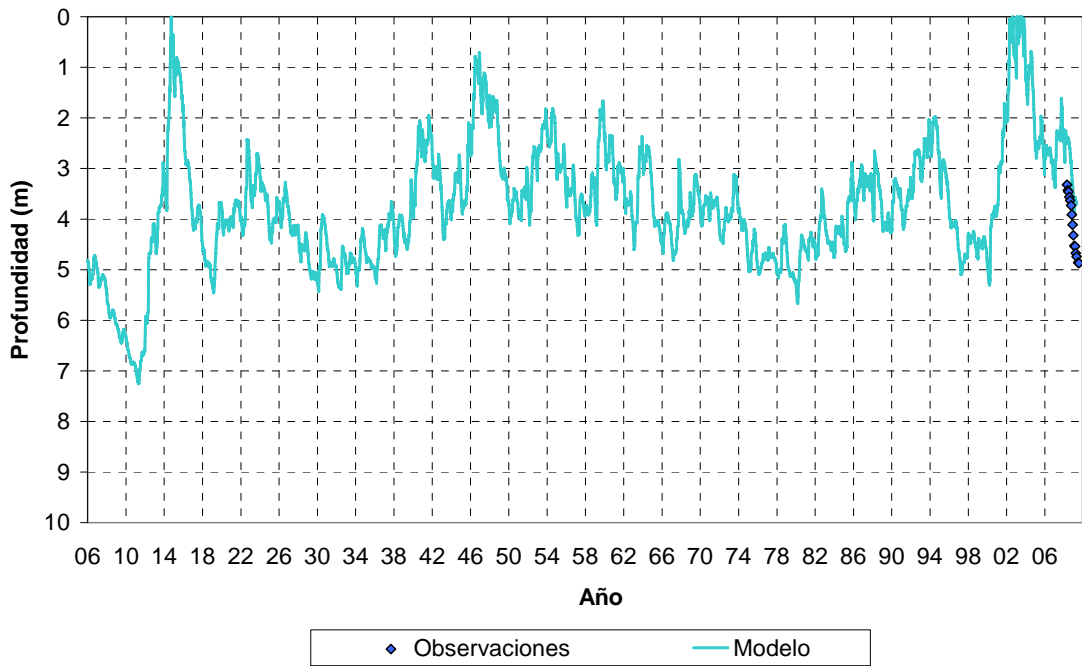
Figura 4.1.2. Correlación de evapotranspiración entre las estaciones Ezeiza y Villa Ortúzar para el período 1960-2009

Para representar condiciones naturales, se eliminó todo tipo de acción antrópica, a saber: la impermeabilidad por urbanización, las extracciones de agua desde los acuíferos para abastecimiento humano o industrial, las pérdidas en las conducciones y los aportes de agua al acuífero Pampeano desde pozos negros.

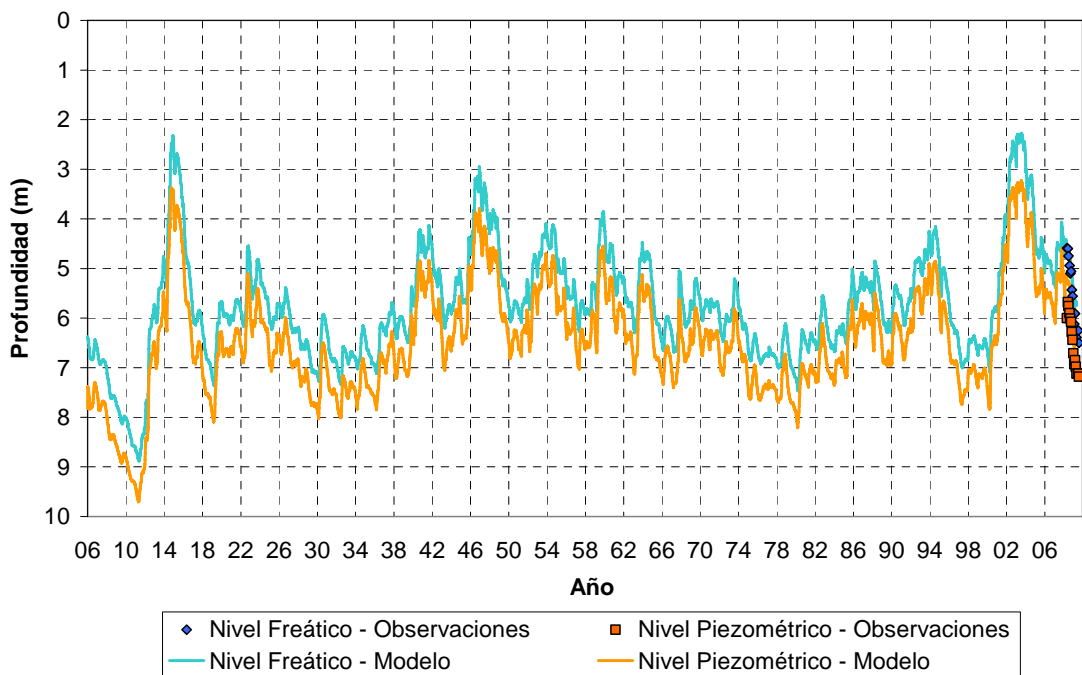
En la Figura 4.1.3 se muestran series de niveles freáticos (Pampeano) y piezométricos (Puelche) para tres puntos de la cuenca alta coincidentes con pozos actuales de muestreo. Se incluyen los valores medidos en esos pozos, que muestran una buena coincidencia con los resultados del modelo para ese relativamente corto período de tiempo. Esto es así porque la cuenca alta ha permanecido relativamente poco urbanizada. Se observa el ascenso del nivel de la napa freática para los años 2000-2003, que produjo una situación crítica en la zona urbanizada. Nótese que una situación similar ya se había presentado en los años 1912-1915.



a) Nivel freático en Pozo 18



b) Nivel freático en Pozo 22



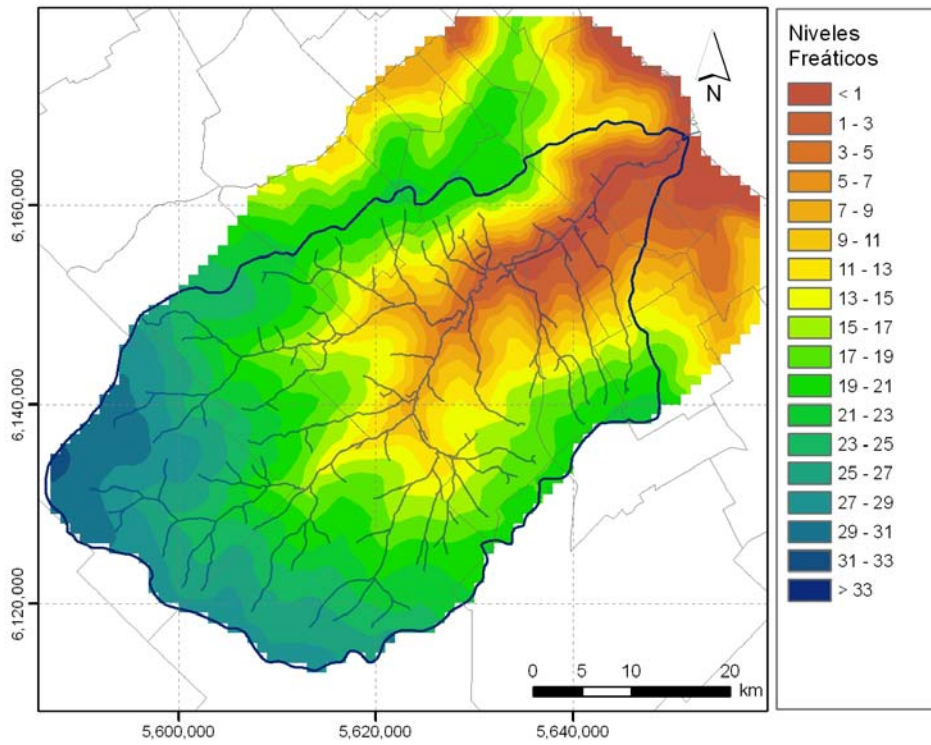
c) Niveles en Pozo 11

Figura 4.1.3. Series de niveles sobre el período 1906-2009 para la cuenca alta

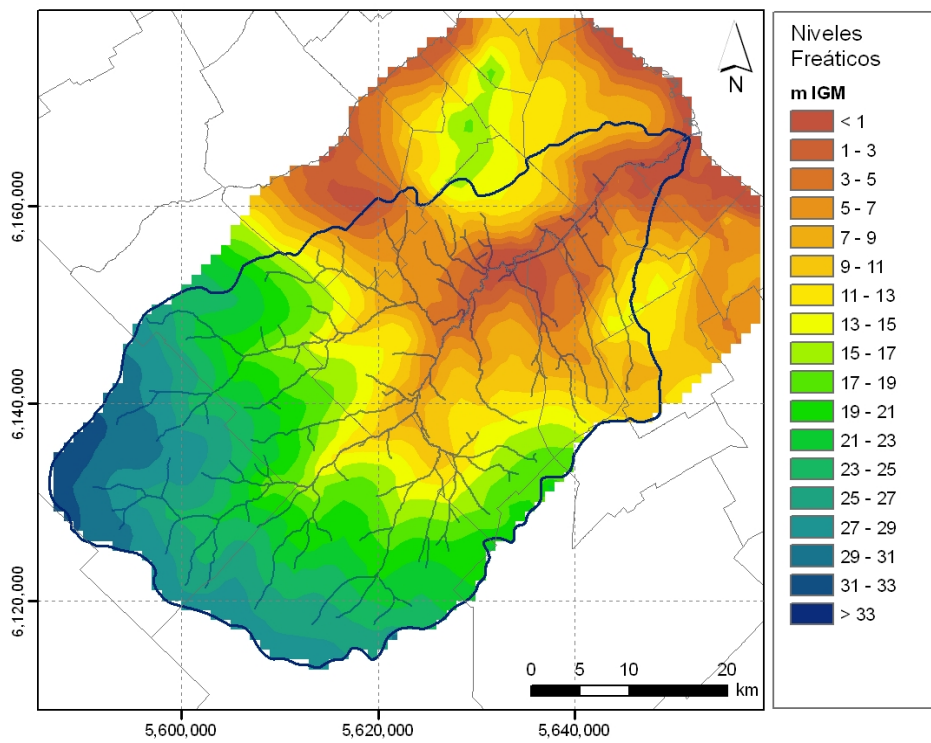
Las Figura 4.1.4 y 4.1.5 presentan las distribuciones de nivel freático y piezométrico, respectivamente, para el tiempo presente (febrero de 2009), junto con la correspondiente a la cuenca antropizada actual. En la condición natural se observa el comportamiento hidráulico clásico de los niveles subterráneos de cuencas de llanura, de fuerte correspondencia con la topografía del terreno y la red de drenaje superficial. Nótese que el escurrimiento subterráneo, que se desarrolla esencialmente en sentido de sudoeste a noreste, presenta una coincidencia entre las divisorias de cuenca superficial y subterránea. Se observa que las distribuciones correspondientes a la cuenca natural y antropizada resultan similares en la cuenca alta, donde la antropización es baja. En la zona urbanizada se producen, en general, depresiones de los niveles freático y piezométrico respecto de la situación natural, las cuales alcanzan a más de 10 metros en el acuífero Puelche debido a las extracciones.

En la Figura 4.1.6 se muestran las distribuciones de la profundidad freática. Se observa el efecto general de aumento de profundidad producido por la acción antrópica, excepto en zonas del Conurbano Sur (en los partidos de Lanús, Lomas de Zamora, Esteban Echeverría y Quilmes), donde se da el efecto contrario, es decir, una disminución significativa de la profundidad freática. Es decir, si bien esas zonas ya naturalmente mostraban profundidades relativamente bajas de la freática, la antropización las ha disminuido aún más, generando una situación crítica para sus habitantes.

La Figura 4.1.7 presenta la carga hidráulica (es decir, la diferencia entre los niveles freático y piezométrico). Se observa que, en condiciones naturales, la cuenca se comporta de acuerdo a lo esperado: el acuífero Puelche se recarga desde el Pampeano (freático) en las zonas adyacentes a las divisorias de cuencas, y descarga hacia el Pampeano en las adyacencias de los cursos de agua. En cambio, con la cuenca antropizada actual la zona de recarga del Puelche se ha expandido, dejando la descarga hacia el Pampeano limitada sólo a la inmediata vecindad de los cursos de agua. Además, la carga hidráulica ha crecido fuertemente en la zona urbanizada, lo que representa una situación crítica desde el punto de vista de la calidad del agua del acuífero Puelche, ya que la napa freática posee un relativamente alto grado de contaminación en la zona urbana.

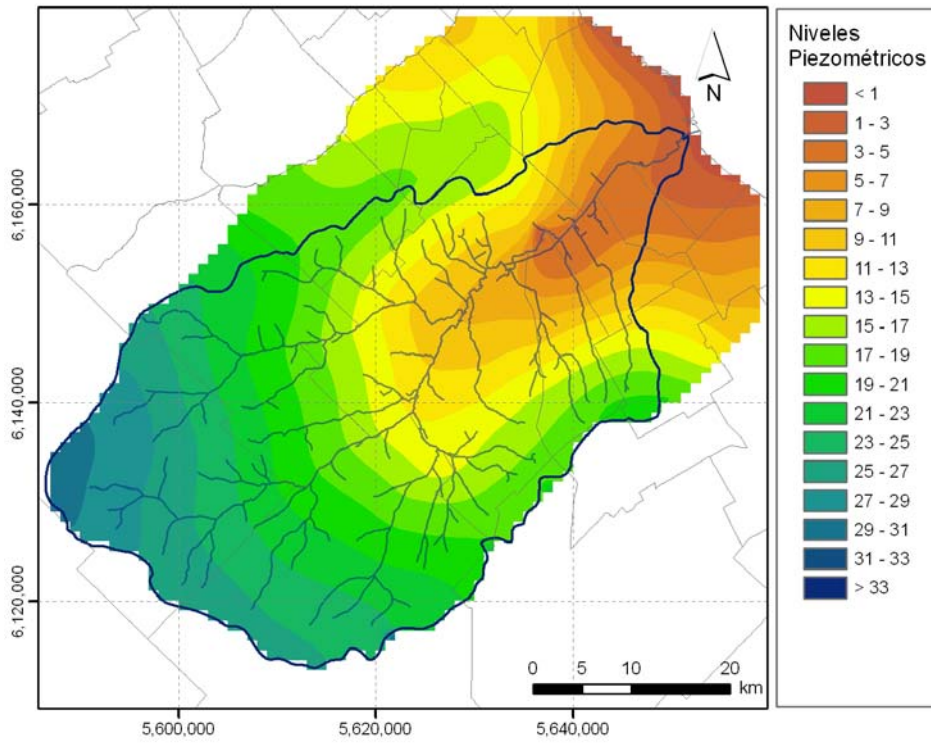


a) Cuenca natural

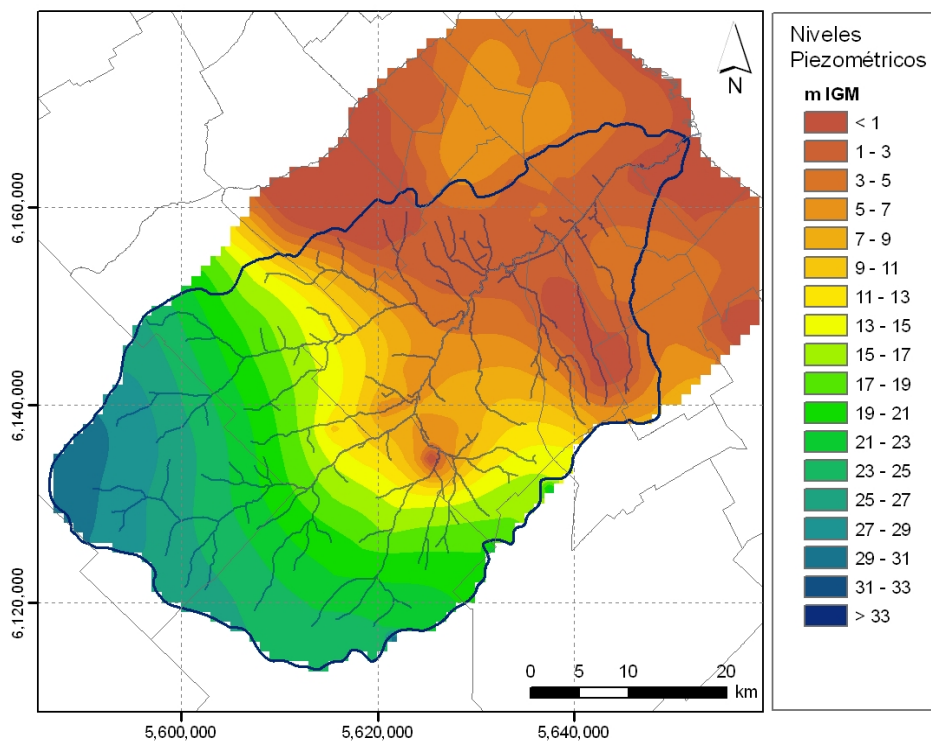


b) Cuenca antropizada actual

Figura 4.1.4. Distribución de nivel freático para el tiempo presente (febrero 2009)

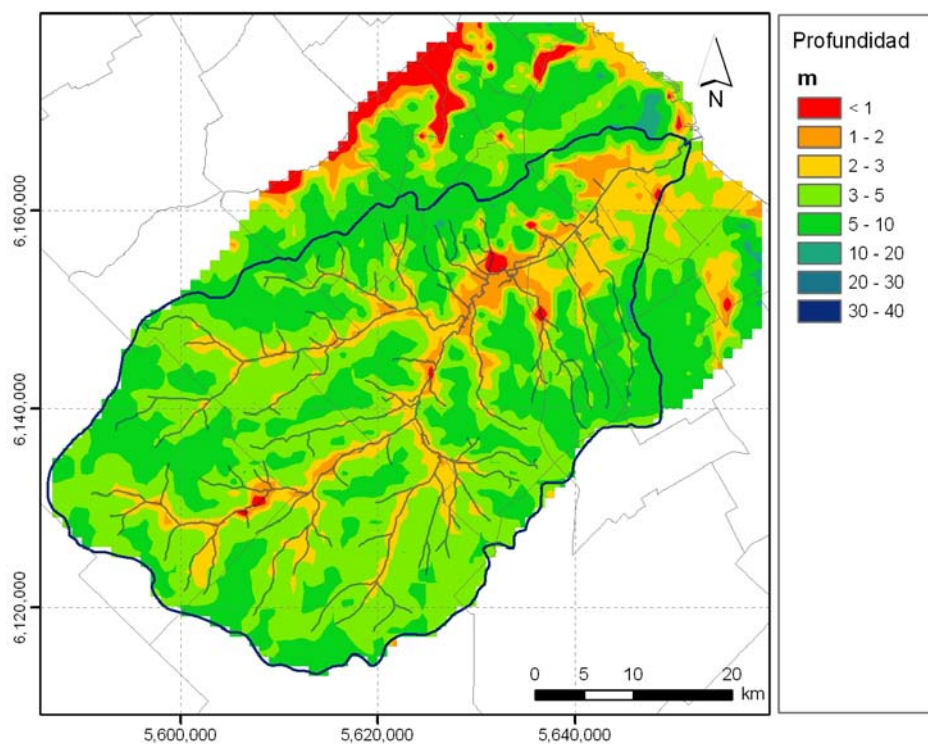


a) Cuenca natural

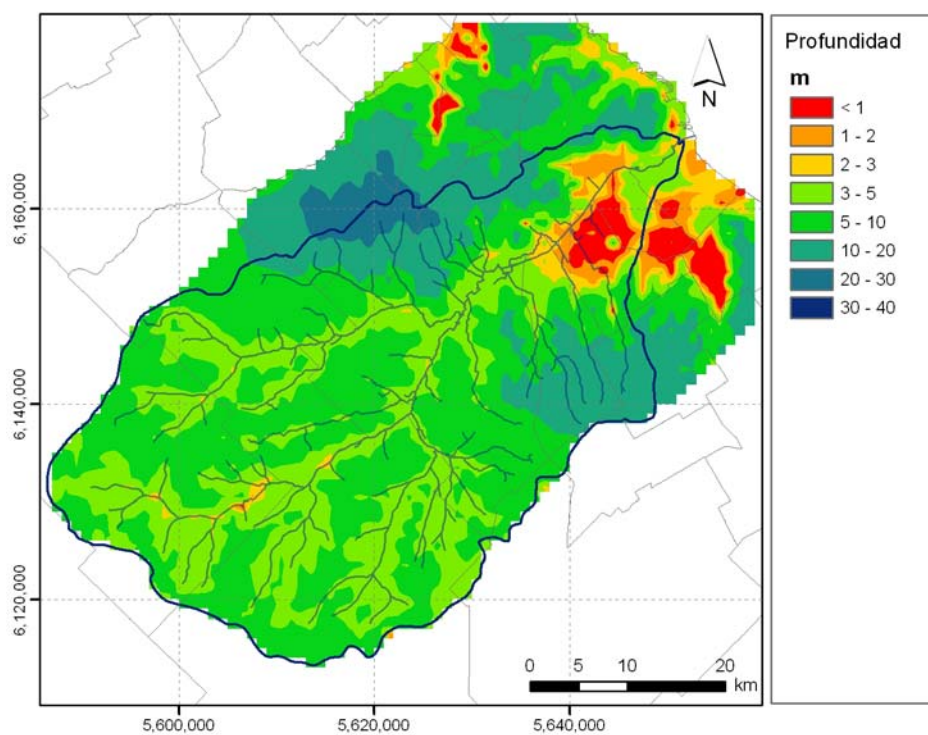


b) Cuenca antropizada actual

Figura 4.1.5. Distribución de niveles piezométricos para el tiempo presente (febrero 2009)

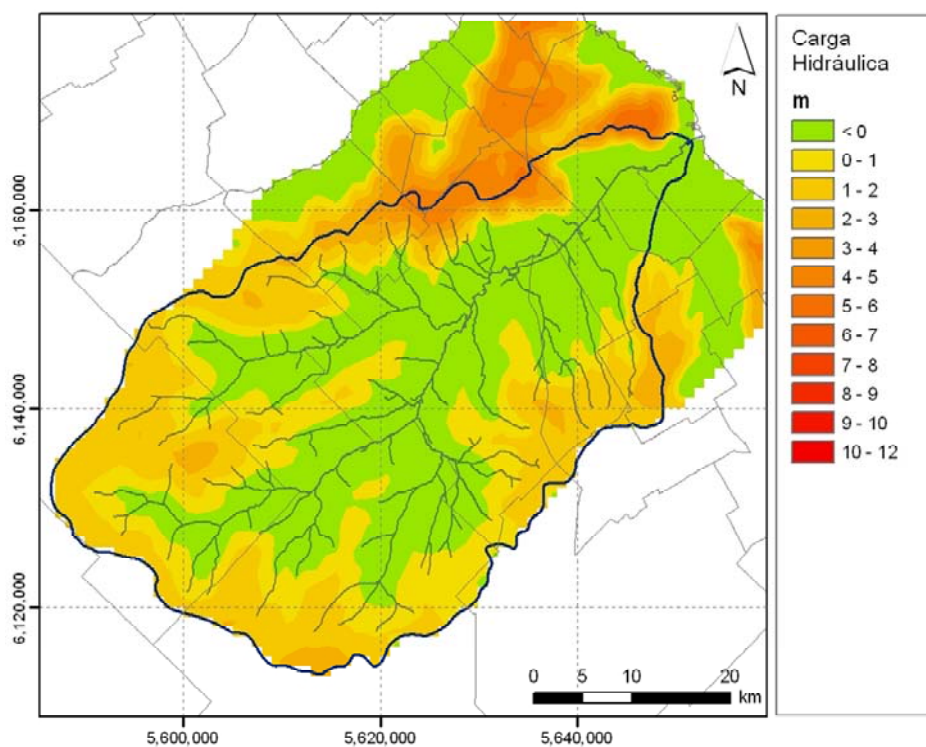


a) Cuenca natural

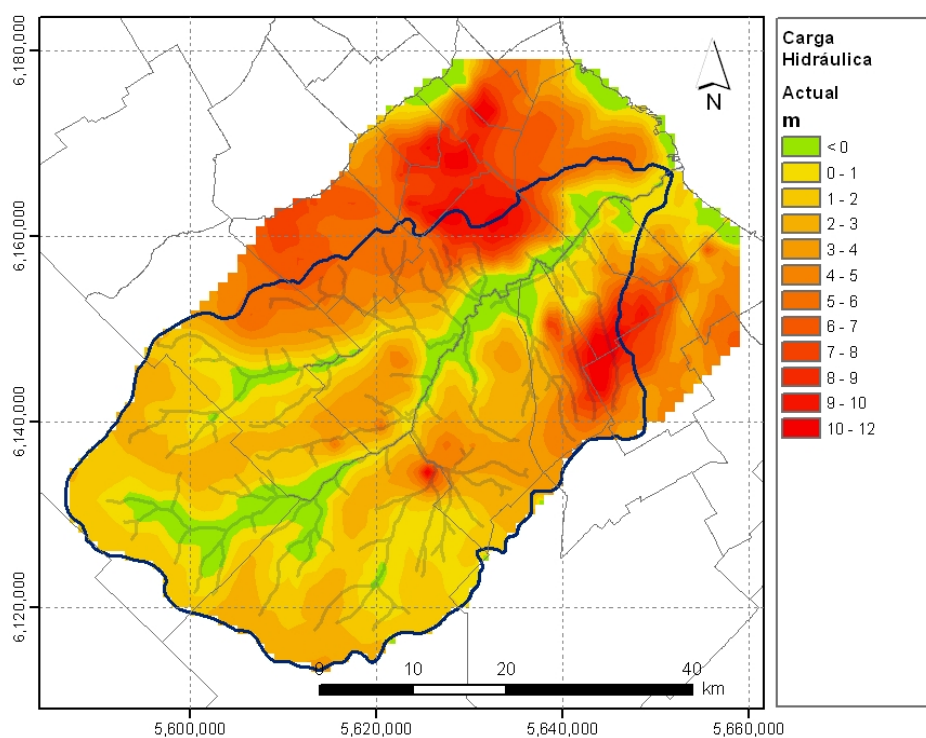


b) Cuenca antropizada actual

Figura 4.1.6. Distribución de profundidad freática para el tiempo presente (febrero 2009)



a) Cuenca natural



b) Cuenca antropizada actual

Figura 4.1.7. Distribución de carga hidráulica para el tiempo presente (febrero 2009)

4.2 Balance de agua de origen antrópico

Se realizó un balance general de los volúmenes de agua provenientes de la actividad humana en el dominio del modelo.

En la Figura 4.2.1 se indica el origen del agua utilizada para las actividades antrópicas. Se observa el rol preponderante del agua importada del Río de la Plata.

Por su parte, la Figura 4.2.2 muestra el destino del agua utilizada para las actividades antrópicas. Se observa la alta importancia relativa de lo escurrido hacia el sistema de drenaje urbano. En parte, esto se debe a que desde muchas de las casas sin conexión a la red cloacal, que poseen pozos negros, se arroja hacia la calle el agua no originada en los baños (no se sobrecarga el pozo negro, economizándose en los costos de los camiones atmosféricos), tal como se ilustra en la Figura 4.2.3.

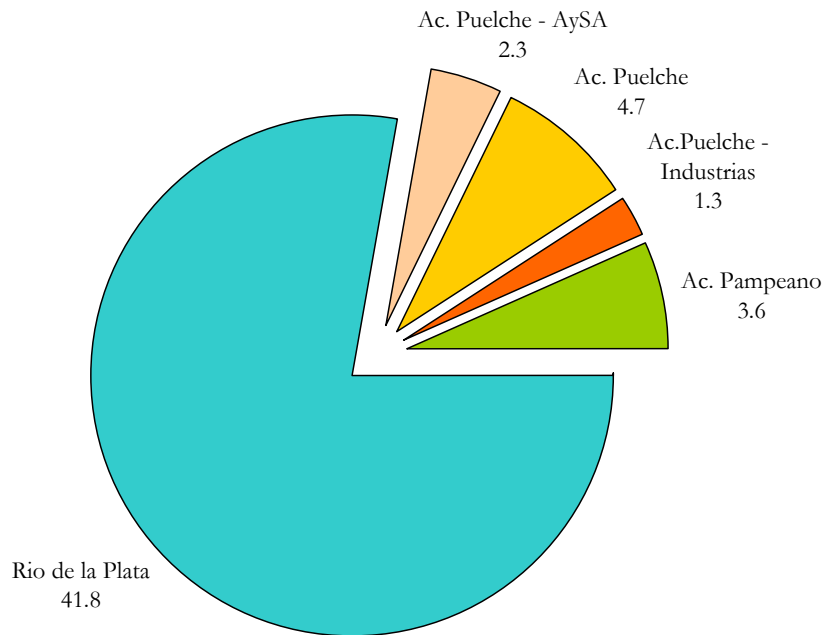


Figura 4.2.1. Orígenes del agua en el dominio del modelo (m³/s)

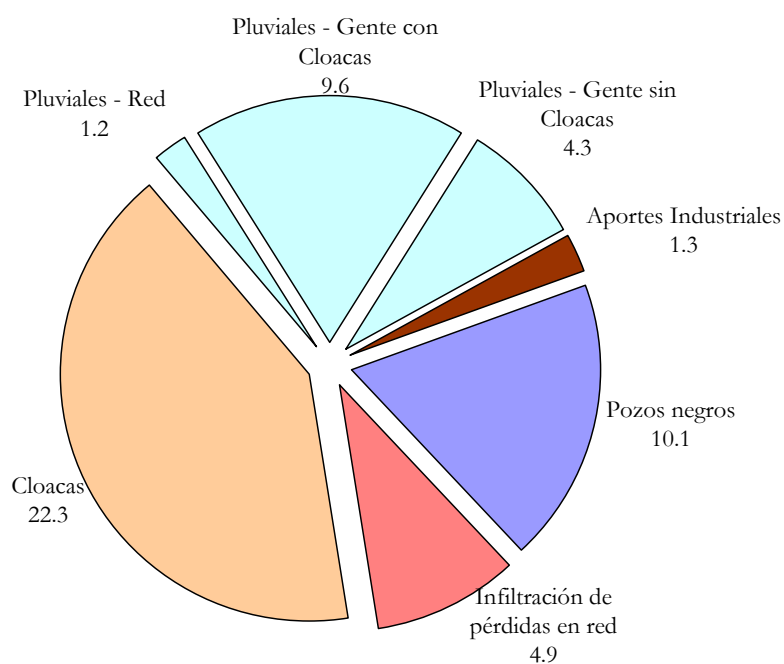


Figura 4.2.2. Destinos del agua de origen antrópico en el dominio del modelo (m³/s)



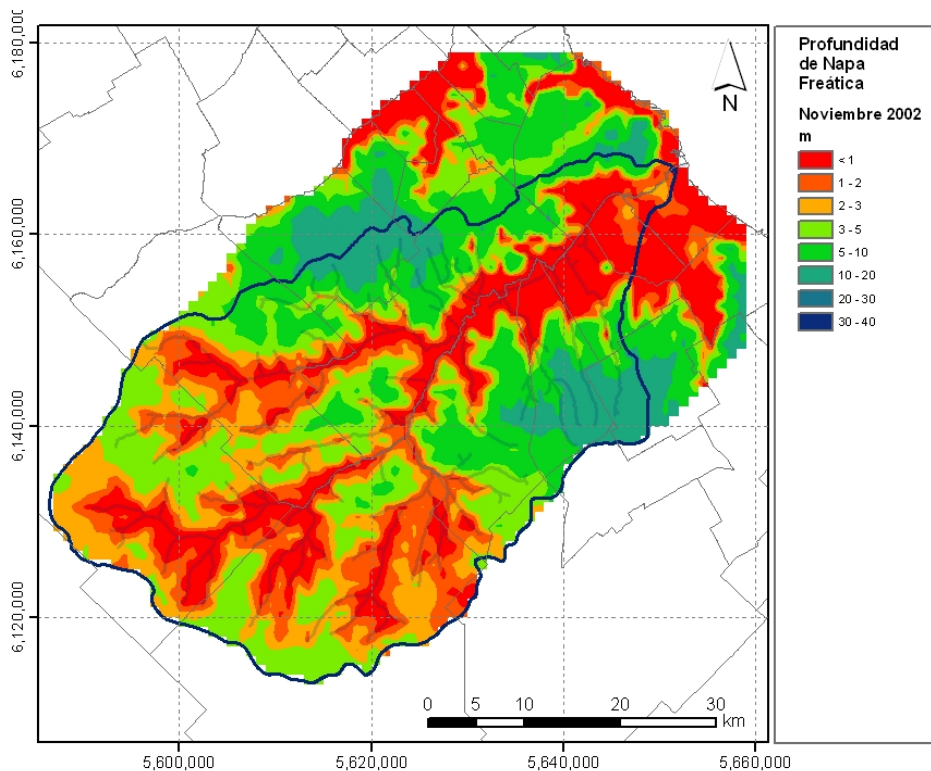
Figura 4.2.3. Foto de la zona de Isidro Casanova. Partido de La Matanza (cerca de Pozo N° 26 de la Red ACuMaR).

4.3 Evolución de cuenca antropizada

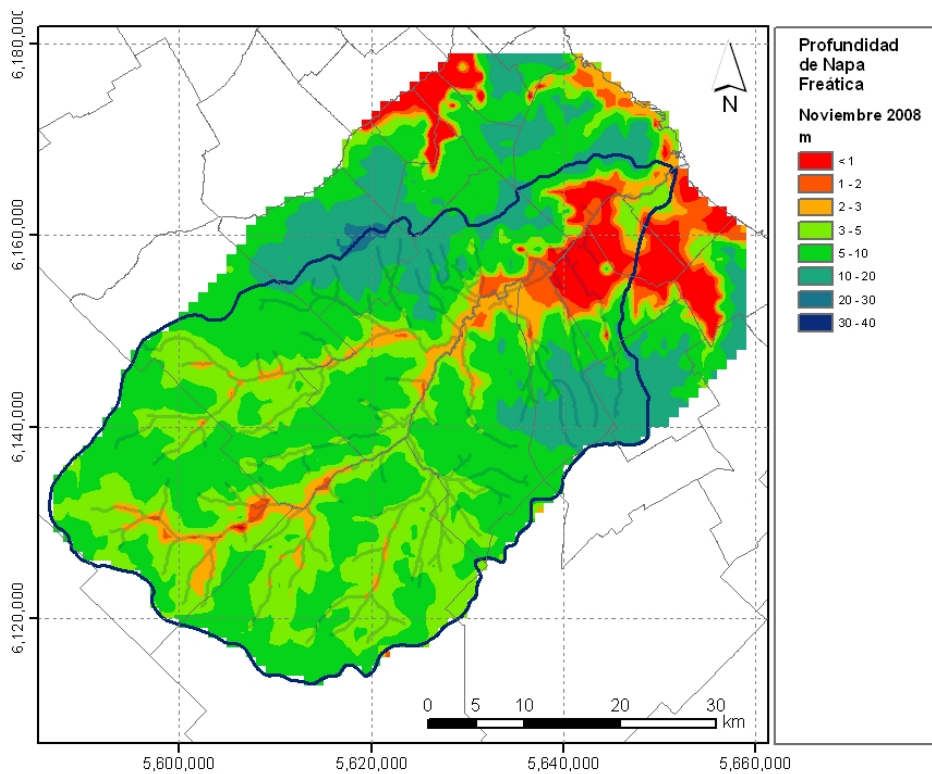
Se efectuaron simulaciones de la evolución histórica de la cuenca en el pasado reciente, haciendo las siguientes hipótesis:

- Los intercambios antrópicos del tipo extracciones y aportes a pozos negros fueron indexados con los datos censales de población.
- Se mantuvieron los porcentajes de población servida, suponiendo que no varió la extensión actual de las redes de servicio de agua potable y cloacas.
- Las condiciones de escurrimiento y áreas urbanizadas se mantuvieron constantes en el tiempo e iguales a las actuales.
- Las extracciones industriales se supusieron constantes en el tiempo.
- Las extracciones de la empresa AySA se supusieron iguales a las del año 2008.

Se obtuvieron las distribuciones de profundidades freáticas para dos instantes de tiempo con situaciones hidrológicas disímiles, a saber, noviembre de 2002, luego de un período de continuas precipitaciones extraordinarias, y noviembre de 2008, luego de un período anómalamente seco. Los resultados se muestran en la Figura 4.3.1. Se observa que la situación de napas elevadas (profundidad freática menor a 1 m) en el Conurbano Sur (especialmente en los partidos de Avellaneda, Lanús, Lomas de Zamora, Esteban Echeverría y Quilmes) se mantiene incluso en una condición de pobreza hidrológica como la del 2008, indicando que la magnitud de las precipitaciones no es el determinante principal de ese problema.



a) Noviembre 2002



a) Noviembre 2008

Figura 4.3.1. Distribución de profundidades freáticas con la cuenca antropizada

4.4 Análisis de sensibilidad a forzantes

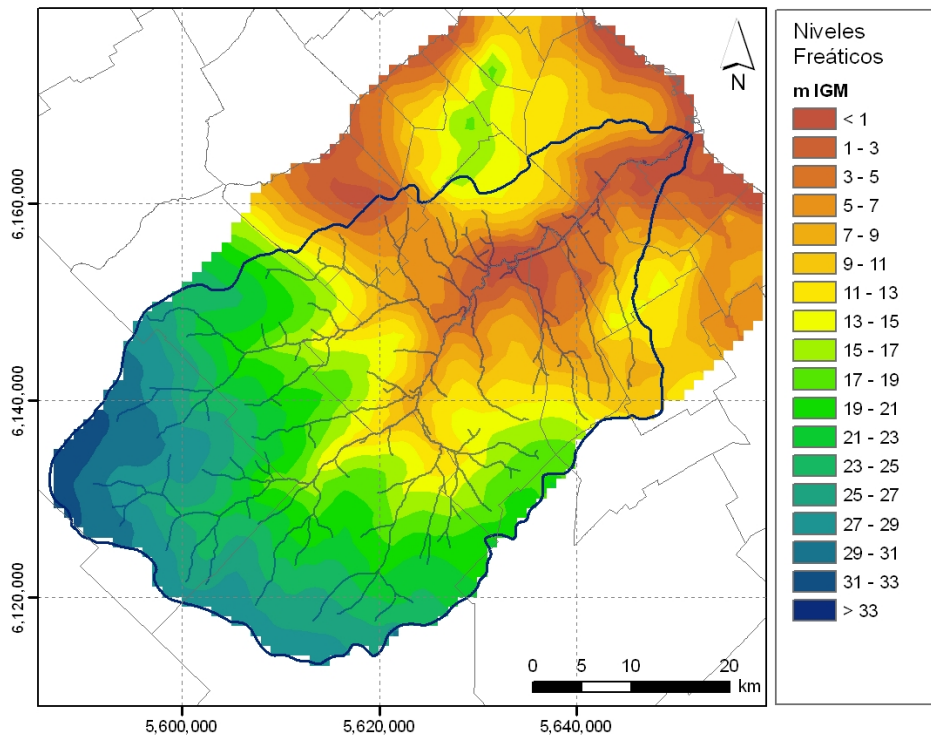
Se efectuaron ensayos con el modelo de modo de determinar la sensibilidad de los niveles freáticos y piezométricos a algunos de los forzantes antrópicos que actúan al presente sobre la cuenca.

4.4.1 Extracciones para grandes industrias

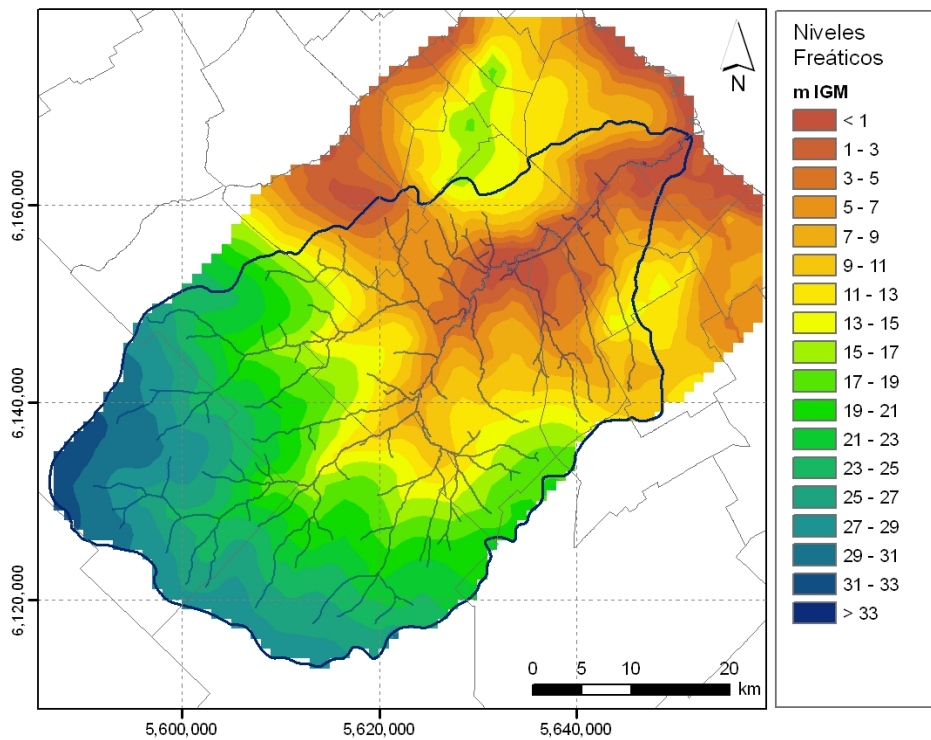
Se procedió a eliminar las extracciones de caudal de las grandes industrias desde el acuífero Puelche. La influencia sobre los niveles freáticos es leve, y se limita a la zona donde se ubican las extracciones, tal como se observa en las Figuras 4.4.1 y 4.4.2. El incremento de nivel freático va desde algo más de 2 m hasta 50 cm en un radio aproximado de 15 km en torno a las más grandes industrias (Figura 4.4.4a).

El efecto es mucho más significativo sobre los niveles piezométricos, tal como era de esperarse (Figura 4.4.3), desapareciendo los conos de depresión generados en torno a las mayores industrias. El radio de influencia se extiende hasta alrededor de 20 km, con incrementos que superan los 7 m (Figura 4.4.4b).

La zona de descarga desde el Puelche al Pampeano se expande en la región de las grandes industrias (Figura 4.4.5).

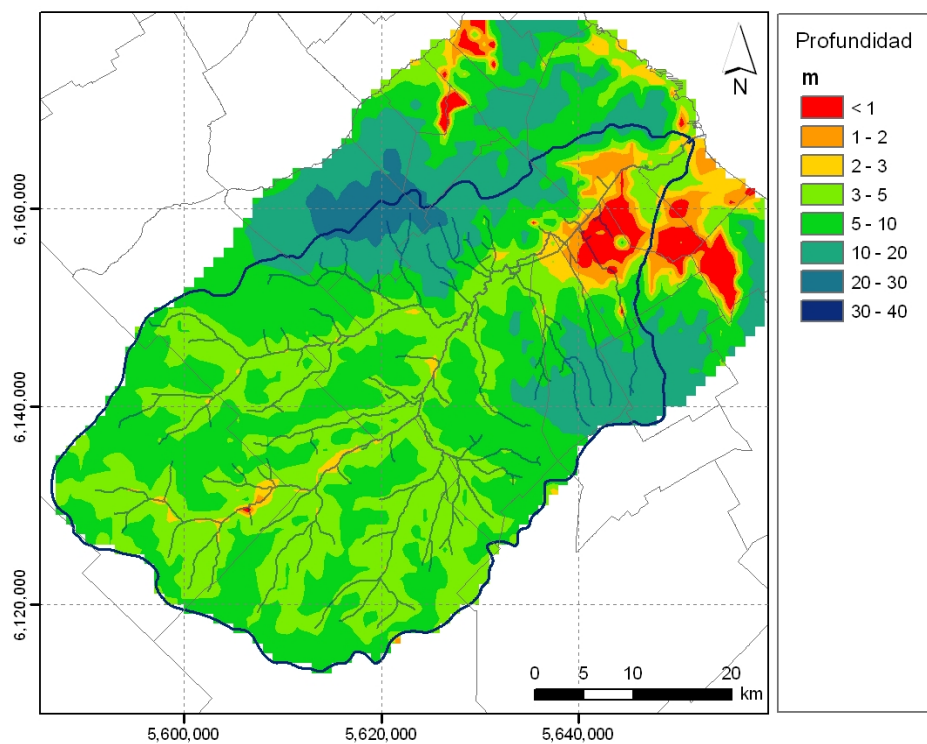


a) Sin extracciones de grandes industrias

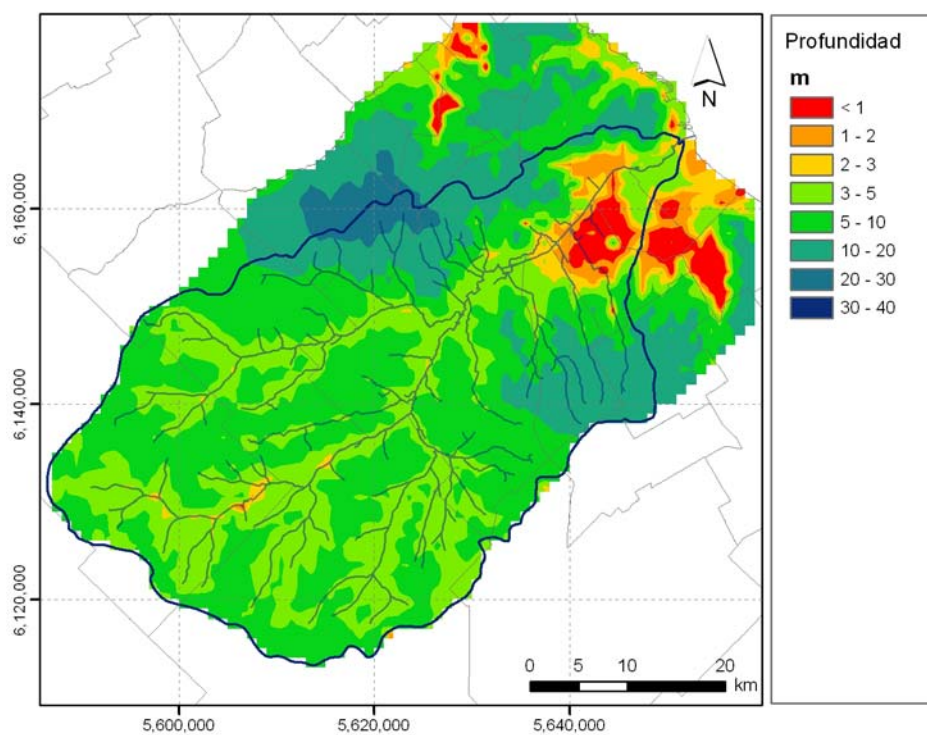


b) Con extracciones de grandes industrias

Figura 4.4.1. Distribución de nivel freático para el tiempo presente (febrero 2009)

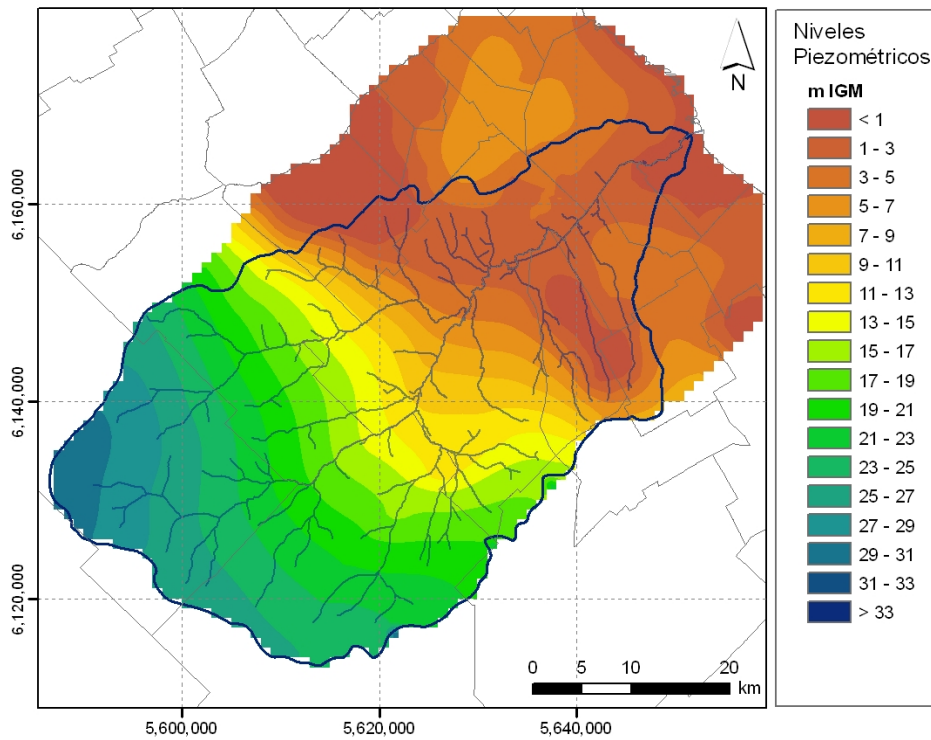


a) Sin extracciones de grandes industrias

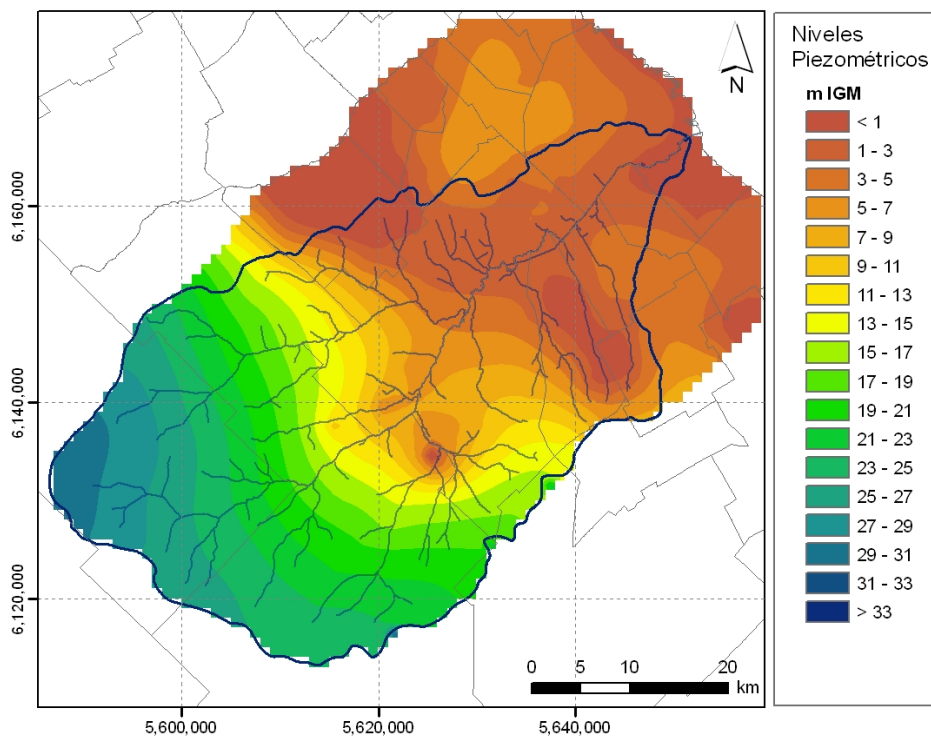


b) Con extracciones de grandes industrias

Figura 4.4.2. Distribución de profundidad freática para el tiempo presente (febrero 2009)

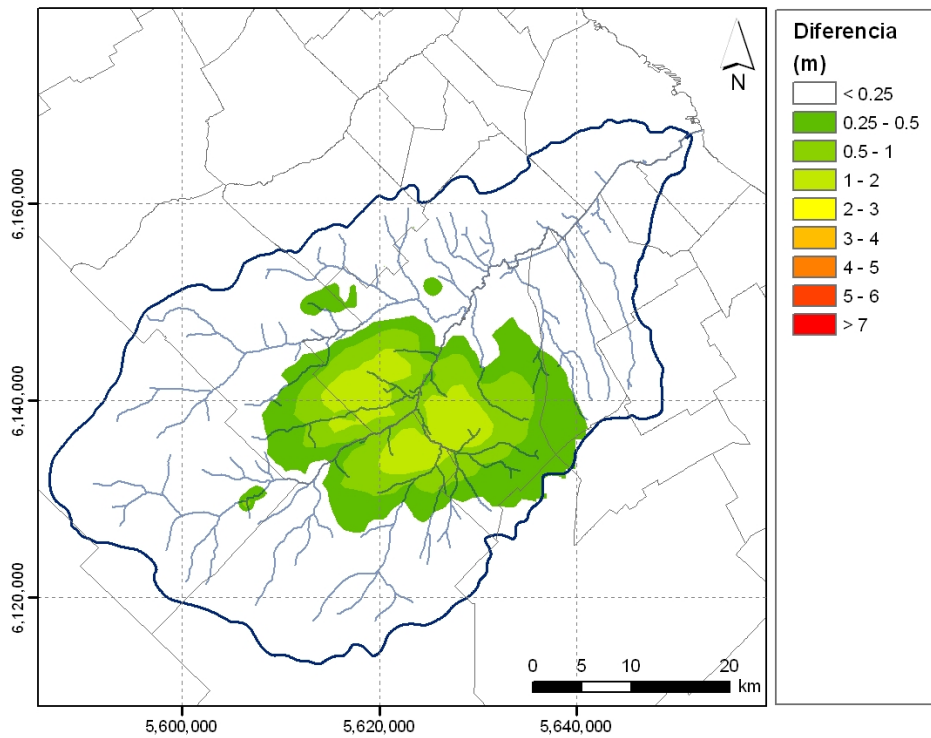


a) Sin extracciones de grandes industrias

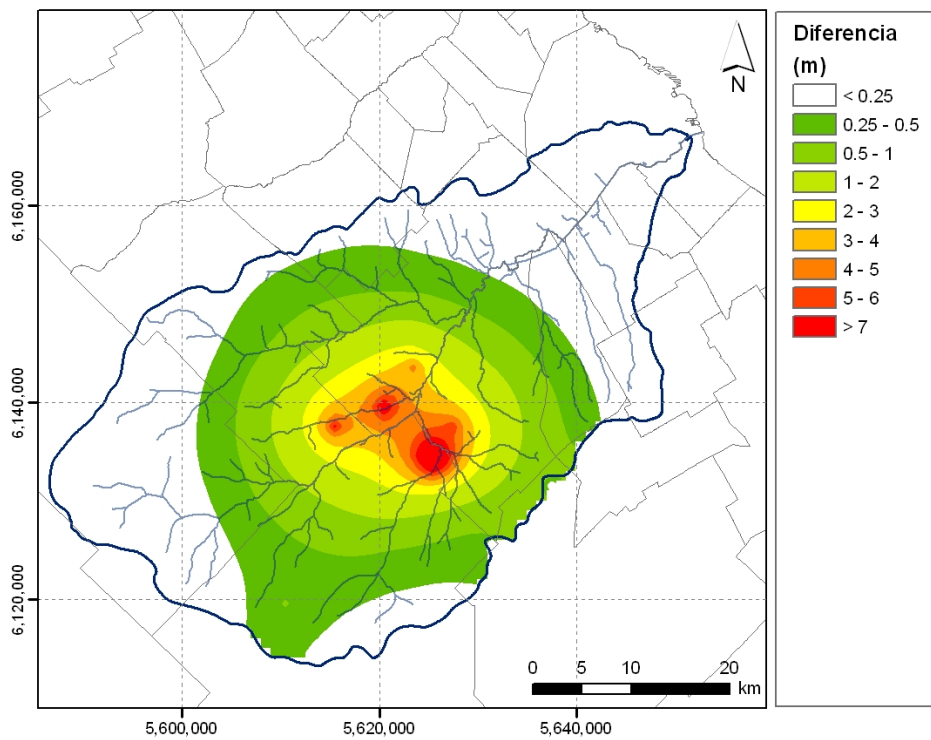


b) Con extracciones de grandes industrias

Figura 4.4.3. Distribución de niveles piezométricos para el tiempo presente (febrero 2009)

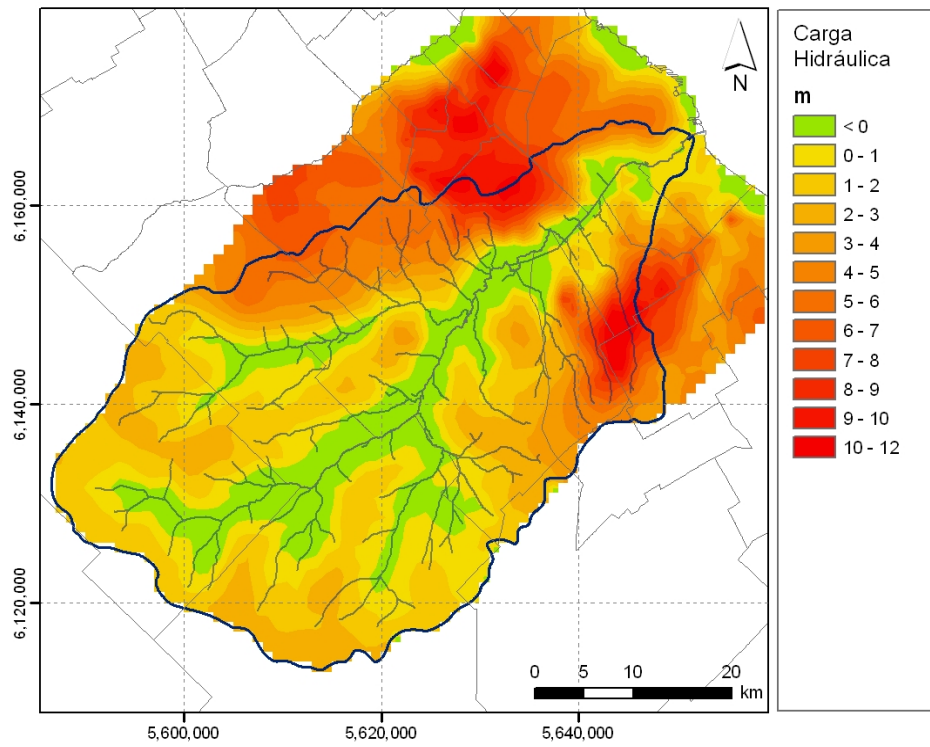


a) Niveles freáticos

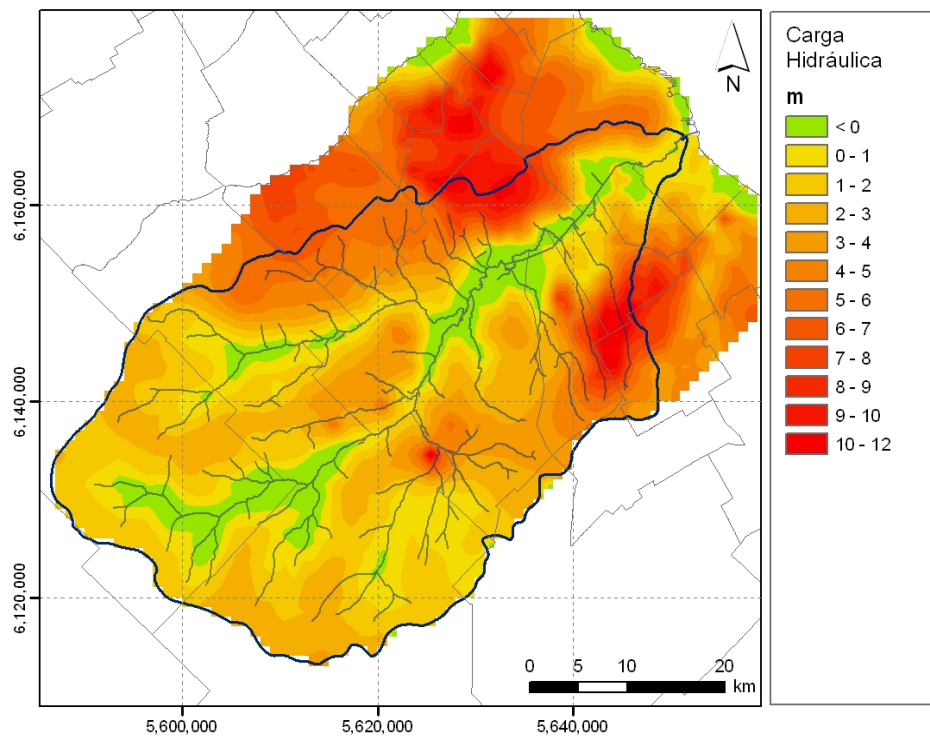


b) Niveles piezométricos

Figura 4.4.4. Diferencia de niveles entre la situación sin y con extracciones de grandes industrias para el tiempo presente (febrero 2009)



a) Sin extracciones de grandes industrias



b) Con extracciones de grandes industrias

Figura 4.4.5. Distribución de carga hidráulica para el tiempo presente (febrero 2009)

4.4.2 Bombeo de AySA

Se estableció un escenario donde se eliminan los bombeos de extracción desde el acuífero Puelche que actualmente efectúa la empresa AySA (Figura 4.4.6), lo cual, en la práctica, significaría que todos los usuarios conectados en la actualidad son abastecidos desde el Río de la Plata.

Nuevamente, la influencia sobre los niveles freáticos es relativamente leve, salvo en la zona de Lomas de Zamora y Almirante Brown, donde la elevación del nivel es notoria (Figuras 4.4.7 y 4.4.8). Esto se observa claramente en la distribución del incremento de nivel freático (Figura 4.4.10a), que muestra valores mayores a 7 m.

El efecto es más extendido y significativo sobre los niveles piezométricos, con la desaparición de los conos de depresión asociados al bombeo (Figura 4.4.9). Las diferencias se presentan en la Figura 4.4.10b.

Aumenta la zona de descarga desde el Puelche al Pampeano y disminuye la carga hidráulica en la región de ubicación de los pozos (Figura 4.4.11).

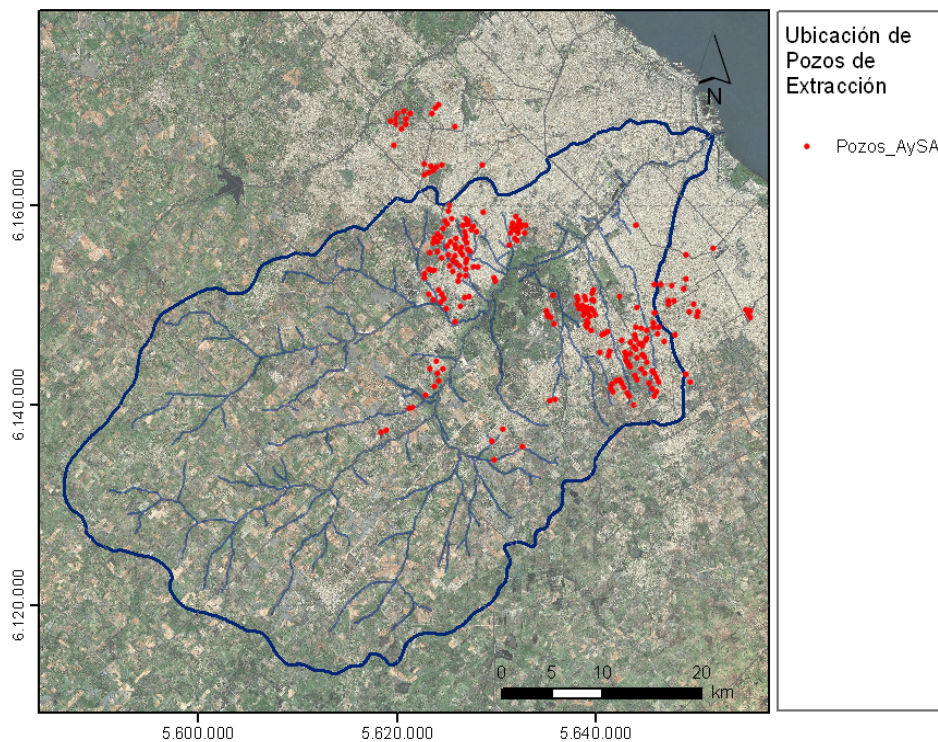
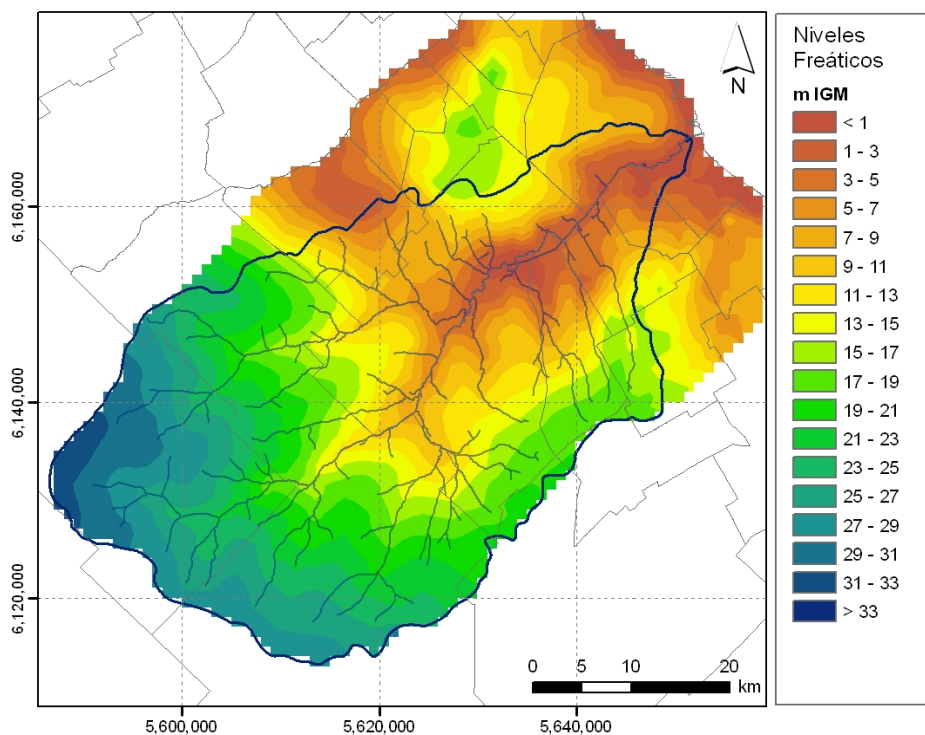
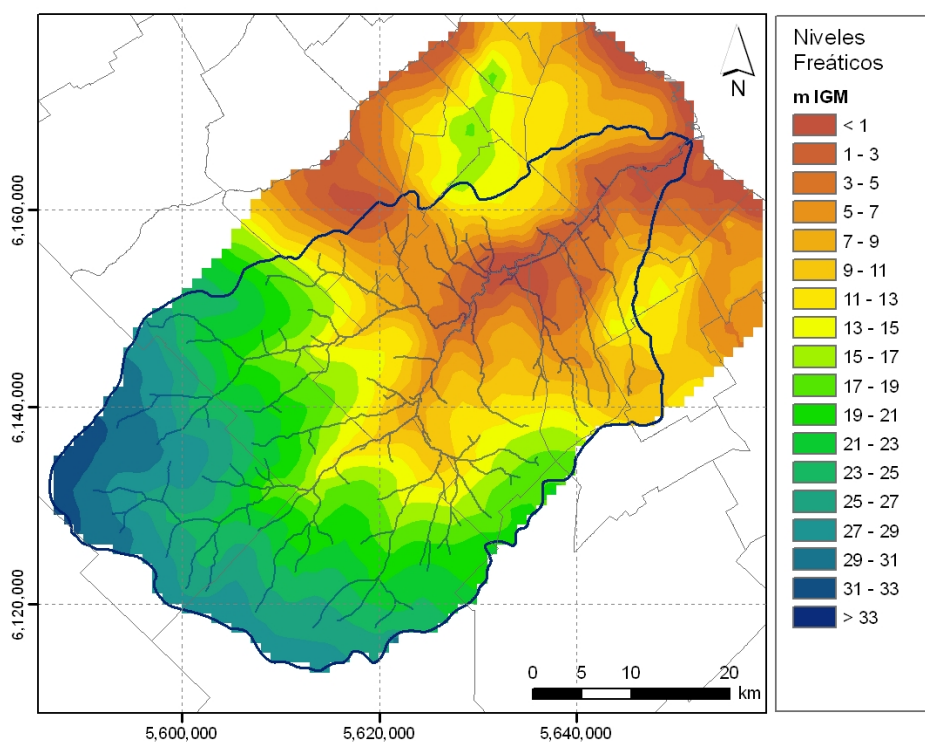


Figura 4.4.6. Ubicación de pozos de AySA

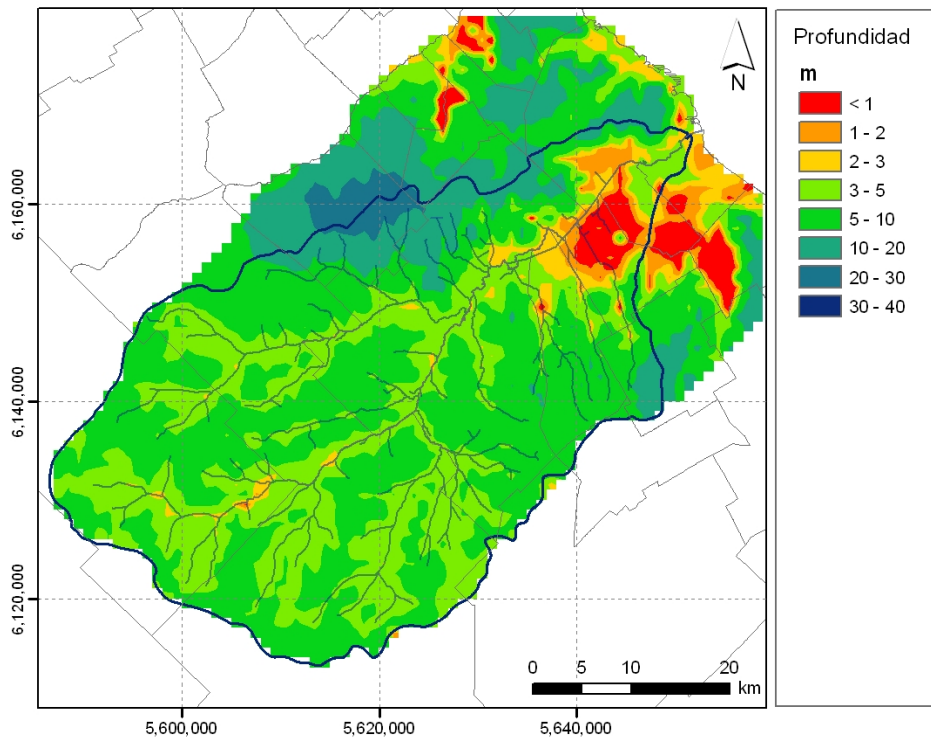


a) Sin extracciones de AySA

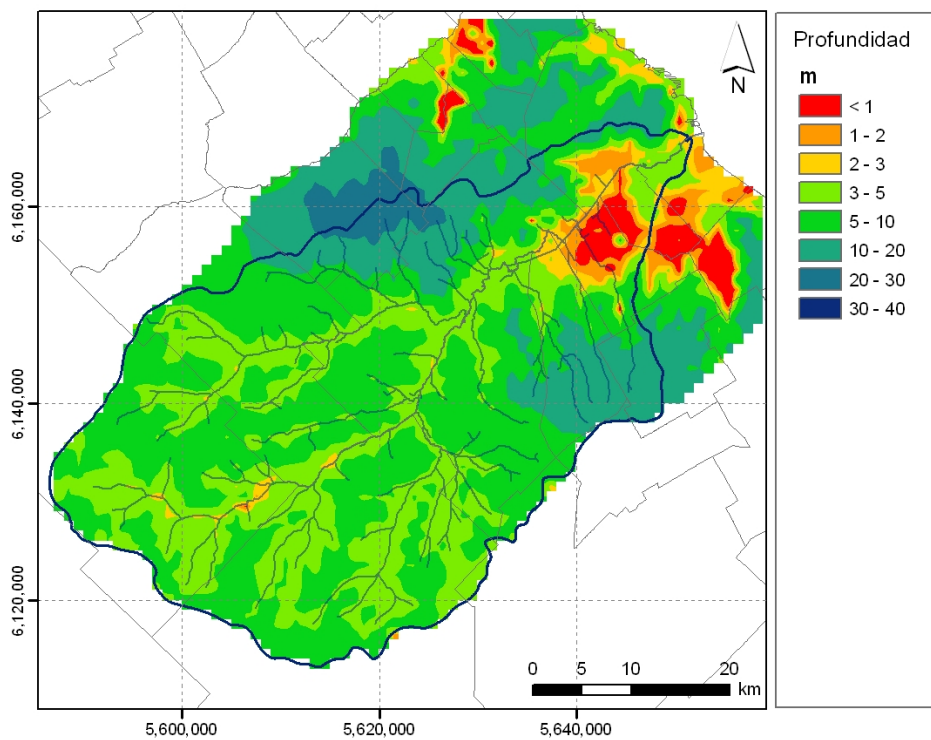


b) Con extracciones de AySA

Figura 4.4.7. Distribución de nivel freático para el tiempo presente (febrero 2009)

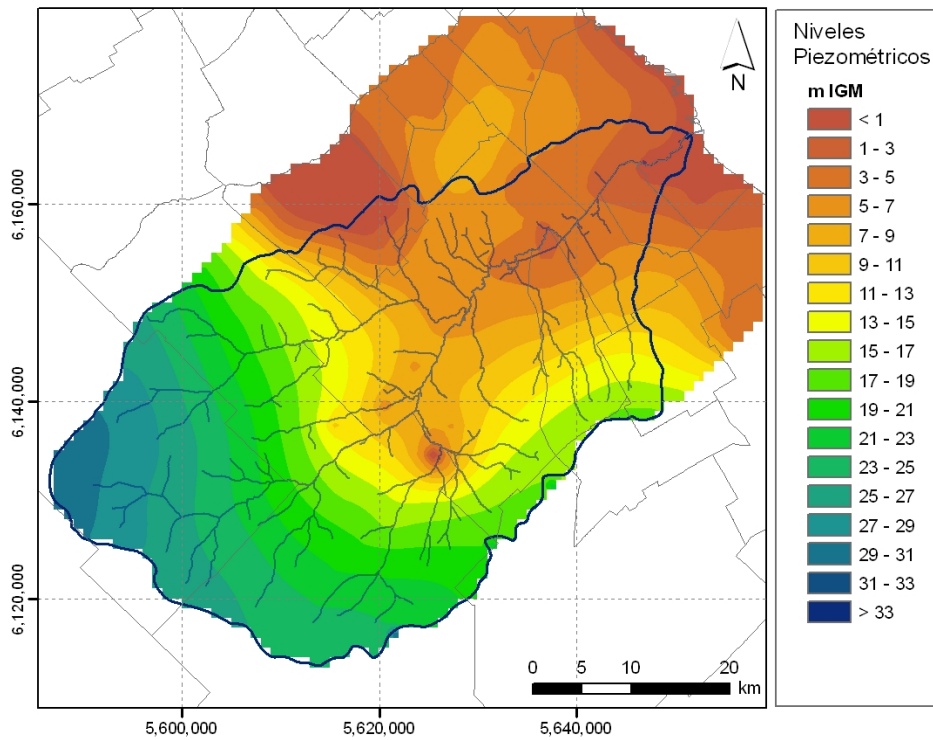


a) Sin extracciones de AySA

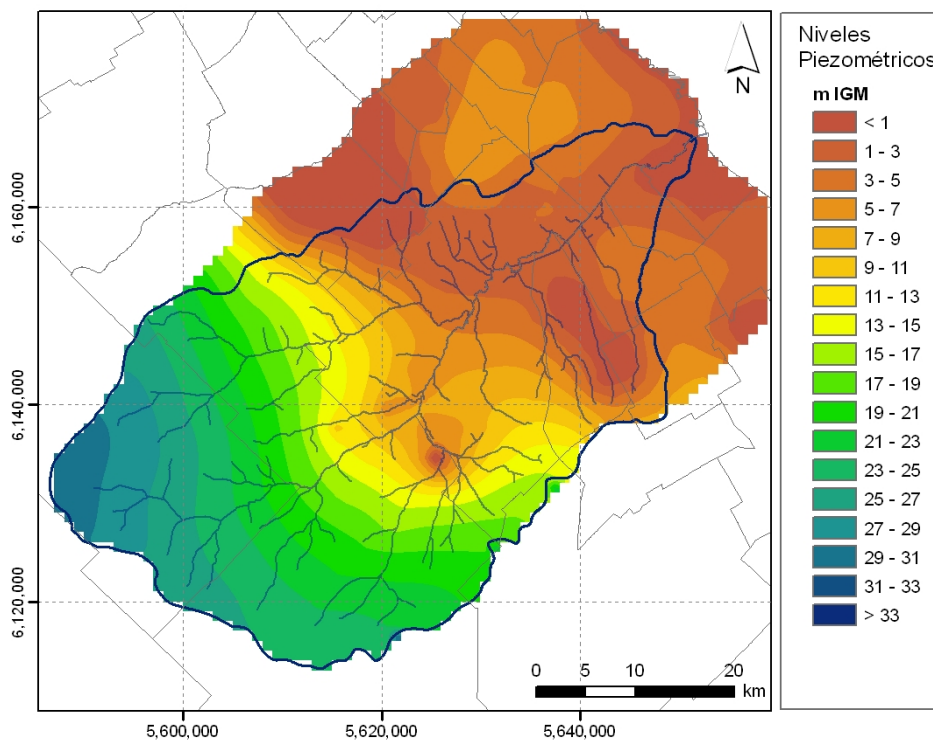


b) Con extracciones de AySA

Figura 4.4.8. Distribución de profundidad freática para el tiempo presente (febrero 2009)

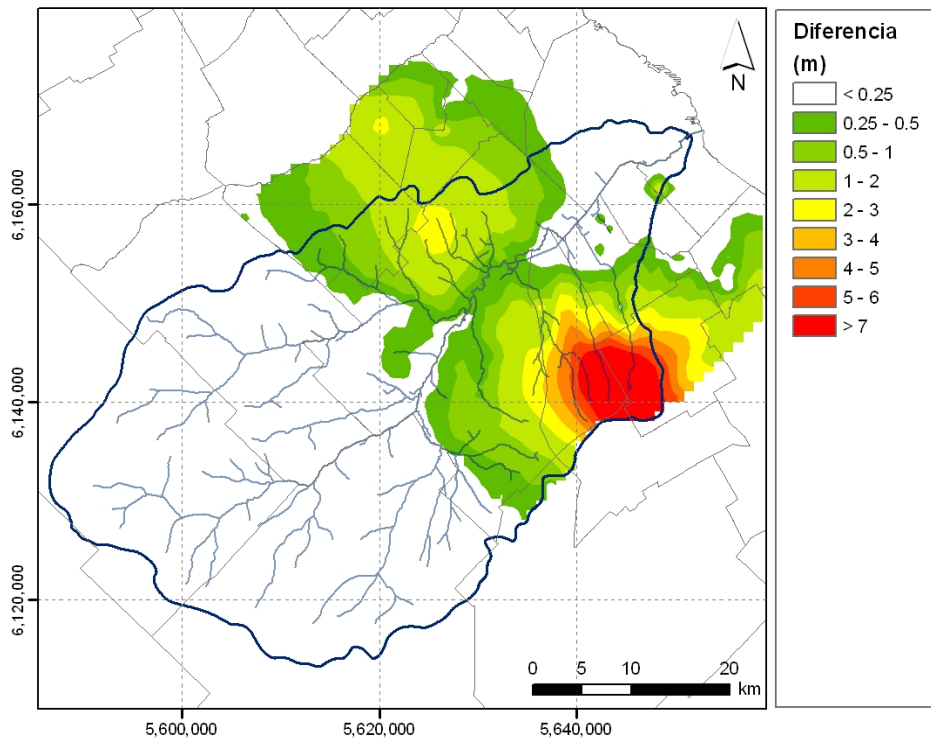


a) Sin extracciones de AySA

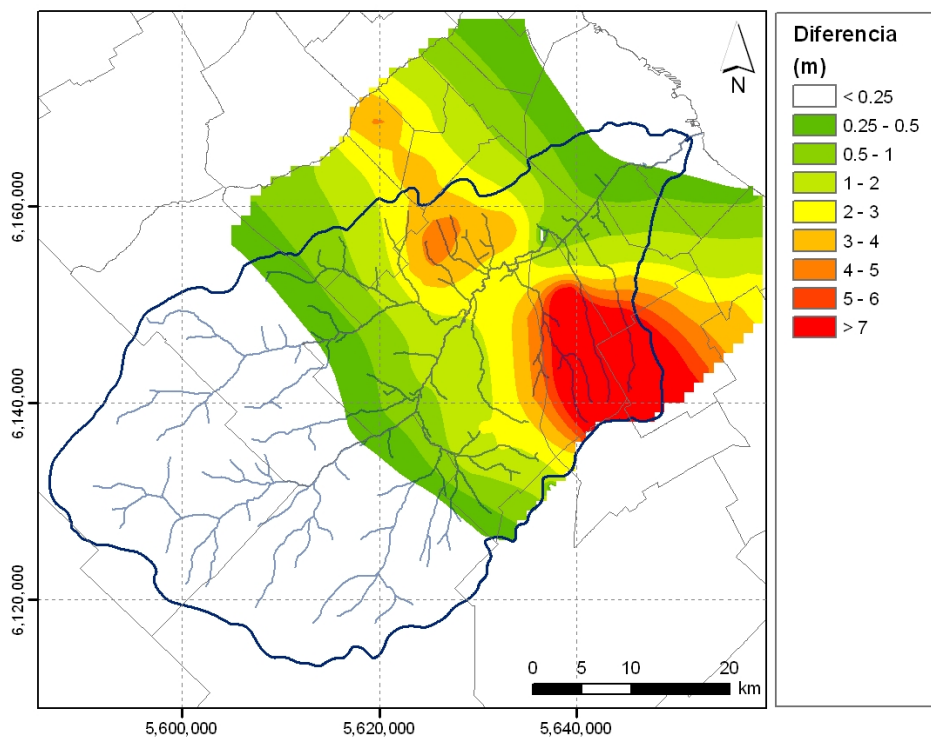


b) Con extracciones de AySA

Figura 4.4.9. Distribución de niveles piezométricos para el tiempo presente (febrero 2009)

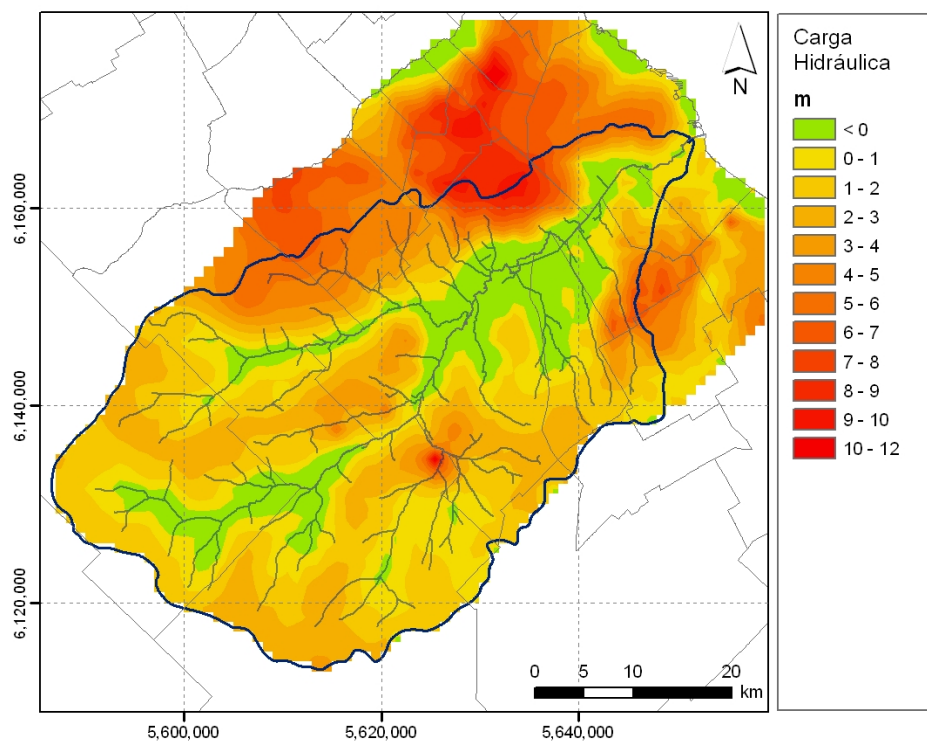


a) Niveles freáticos

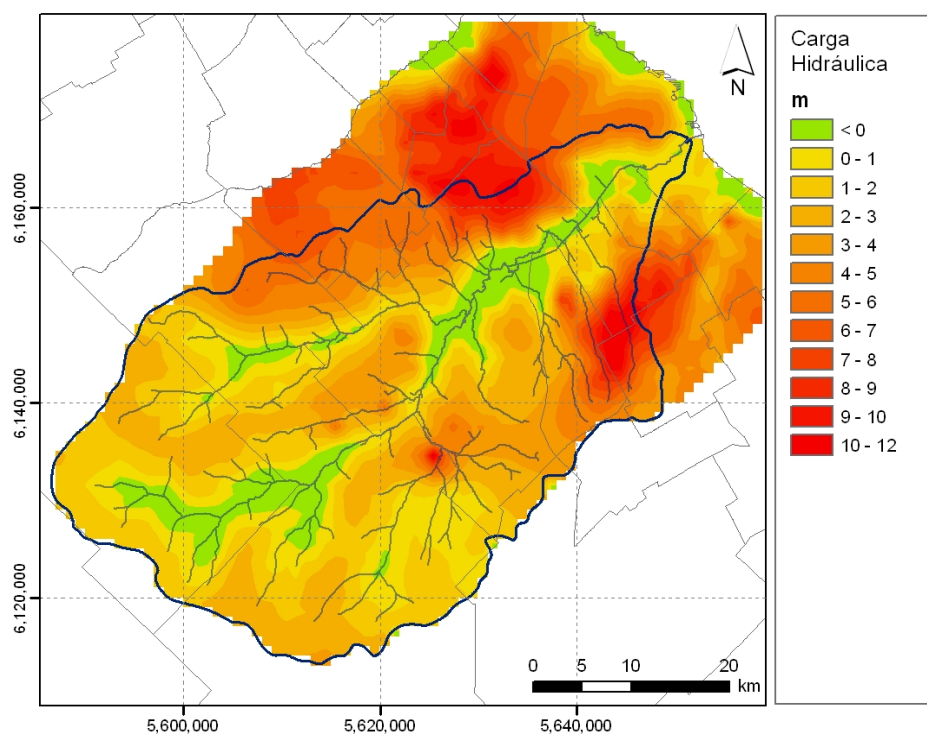


b) Niveles piezométricos

Figura 4.4.10. Diferencia de niveles entre la situación sin y con extracciones de AySA para el tiempo presente (febrero 2009)



a) Sin extracciones de AySA



b) Con extracciones de AySA

Figura 4.4.11. Distribución de carga hidráulica para el tiempo presente (febrero 2009)

4.4.3 Aportes a pozos negros

El tercer escenario consistió en eliminar los aportes desde pozos negros en la zona urbana, lo cual, en la práctica, significaría que todos los usuarios de esa zona disponen de cloacas.

Se observa una significativa disminución del nivel freático en los partidos de Lomas de Zamora, Almirante Brown y Quilmes, por la zona sur, y los partidos de Morón, Tres de Febrero y Merlo, por la zona norte (Figuras 4.4.12 y 4.4.13), con reducciones mayores a los 4 m (Figura 4.4.15a).

Los niveles piezométricos también disminuyen (Figura 4.4.14), sobre una zona algo más acotada pero con mayor intensidad, superando los 7 m en las zonas críticas (Figura 4.4.15b).

Estos cambios conducen a una leve disminución de la carga hidráulica, aunque también se observa una leve reducción de la extensión de la zona de recarga del Puelche desde el Pampeano (Figura 4.4.16).

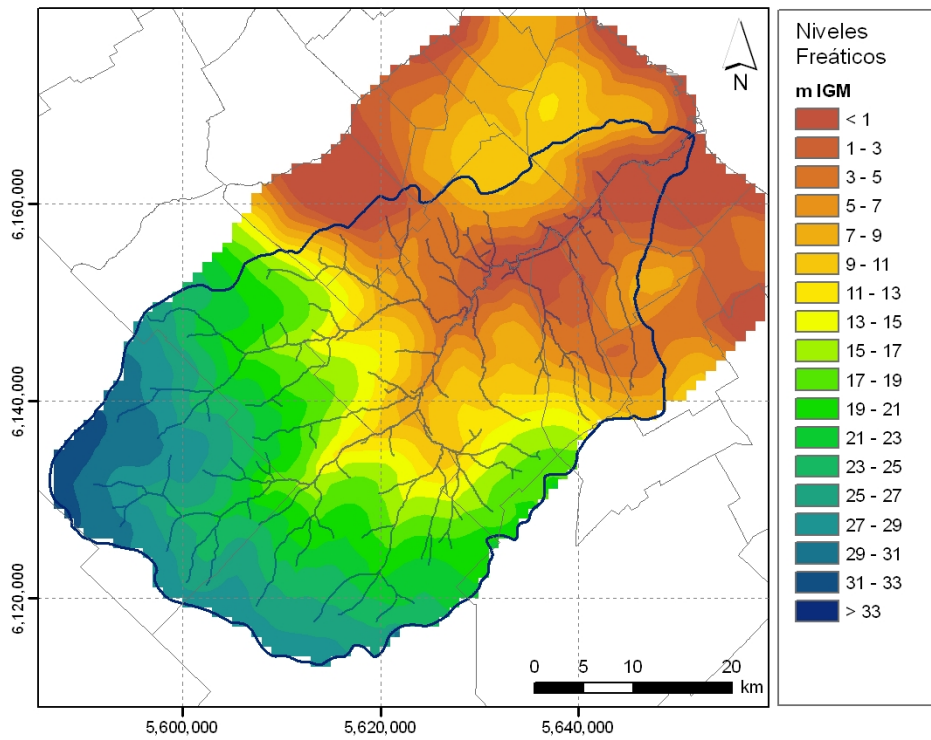
4.4.4 Pérdidas en la red de distribución de agua

Como cuarto escenario de ensayo, se eliminó el aporte proveniente de las pérdidas en la red de distribución de agua.

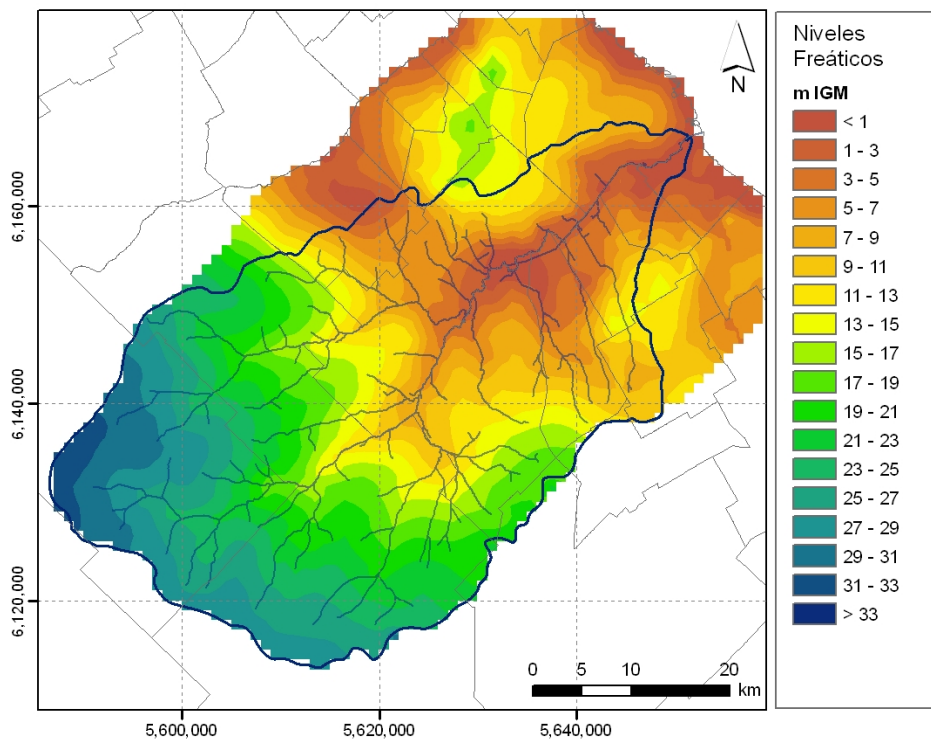
También en este caso se produce una disminución significativa del nivel freático (Figuras 4.4.17 y 4.4.18), aunque esta vez la mayor intensidad se da hacia el norte, con epicentro en la Ciudad de Buenos Aires y el partido de La Matanza, donde la reducción es mayor a los 7 m (Figura 4.4.20a).

Los niveles piezométricos acompañan esa disminución (Figura 4.4.19), pero con menor intensidad (Figura 4.4.20b).

Como en el caso anterior, se observa una leve disminución de la carga hidráulica, junto con una leve reducción de la extensión de la zona de recarga del Puelche desde el Pampeano (Figura 4.4. 21).

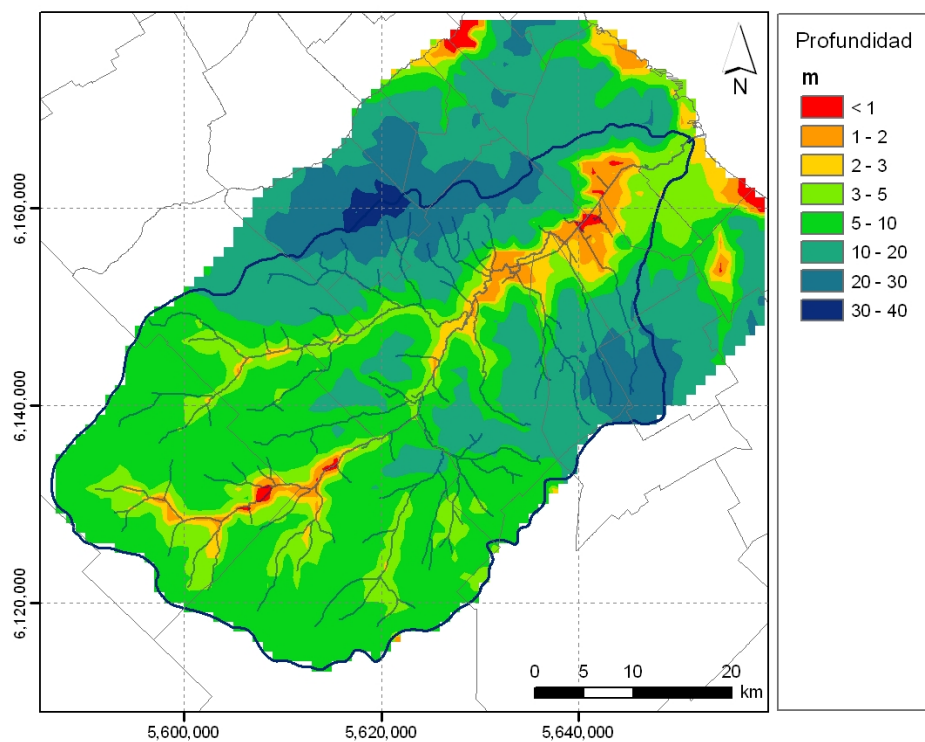


a) Sin aportes a pozos negros

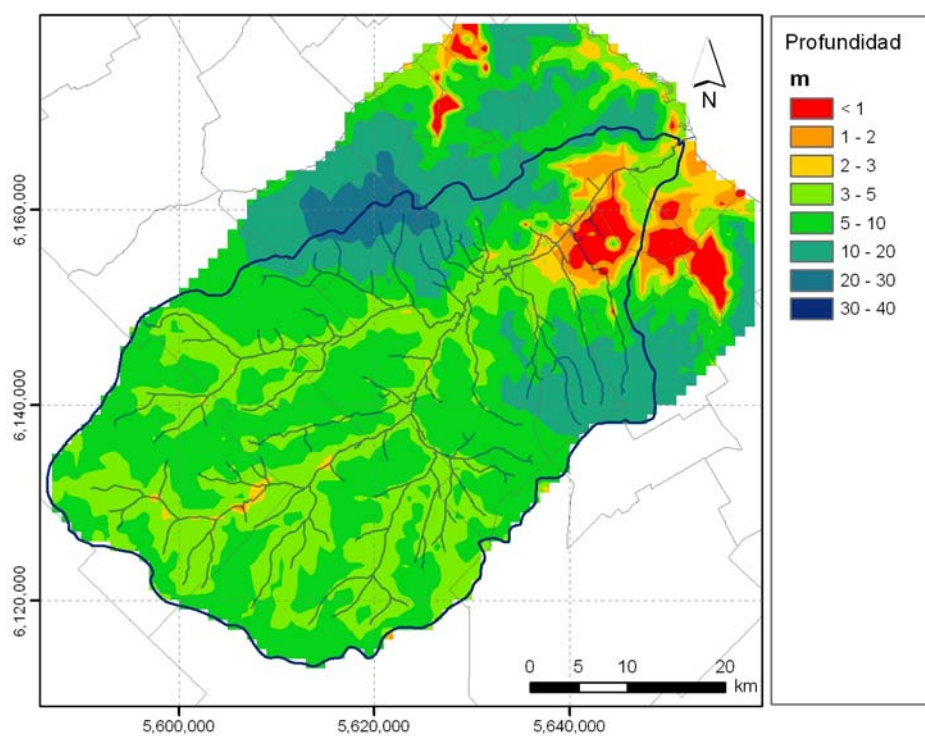


b) Con aportes a pozos negros

Figura 4.4.12. Distribución de nivel freático para el tiempo presente (febrero 2009)

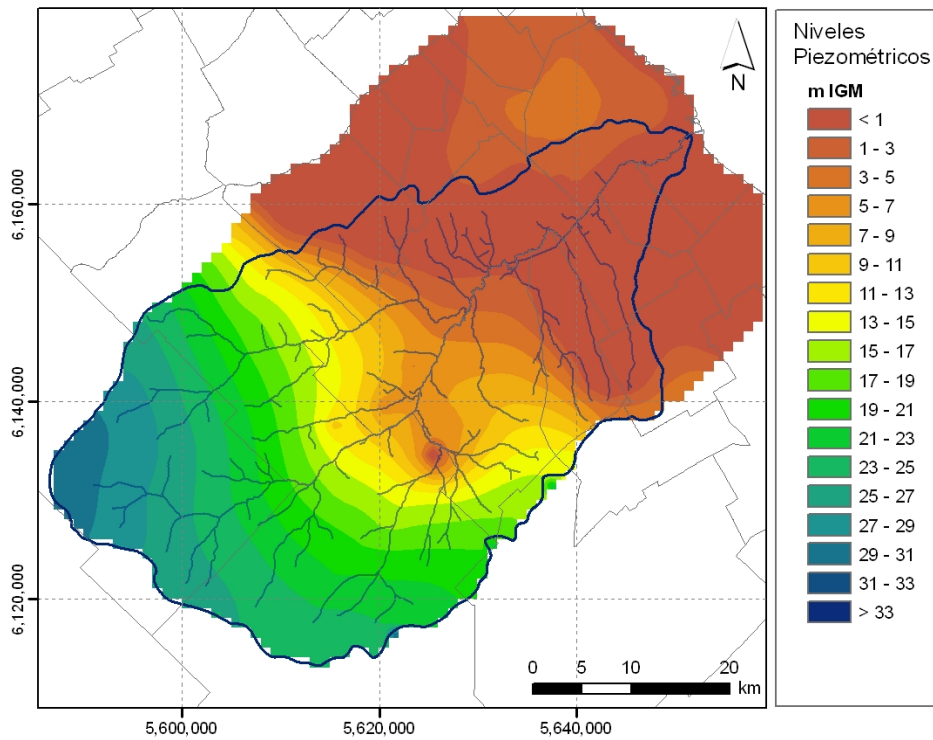


a) Sin aportes a pozos negros

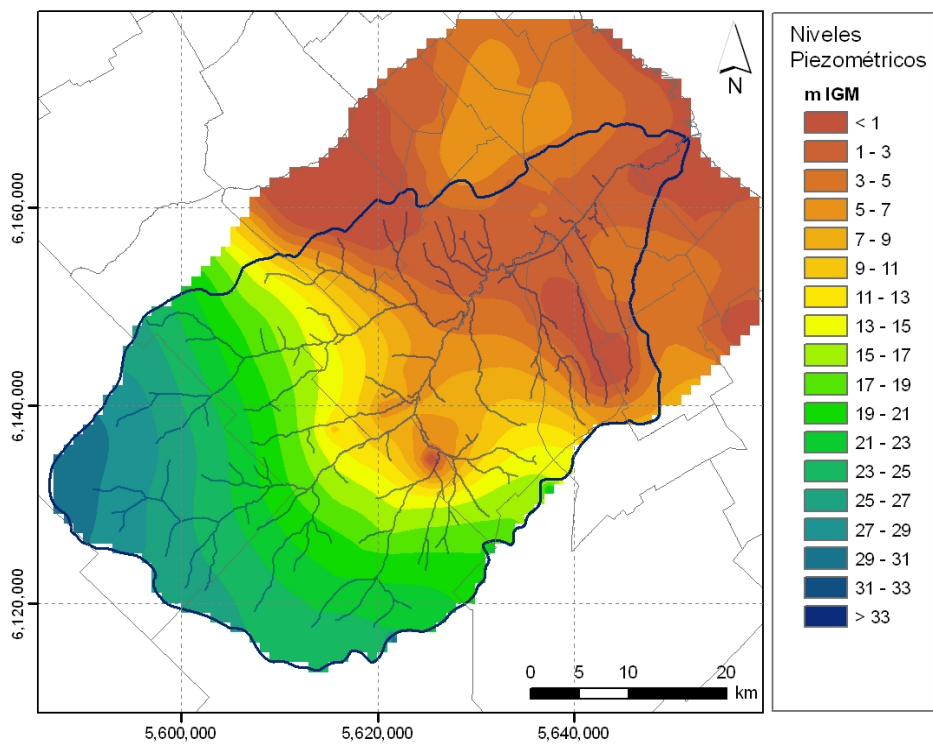


b) Con aportes a pozos negros

Figura 4.4.13. Distribución de profundidad freática para el tiempo presente (febrero 2009)

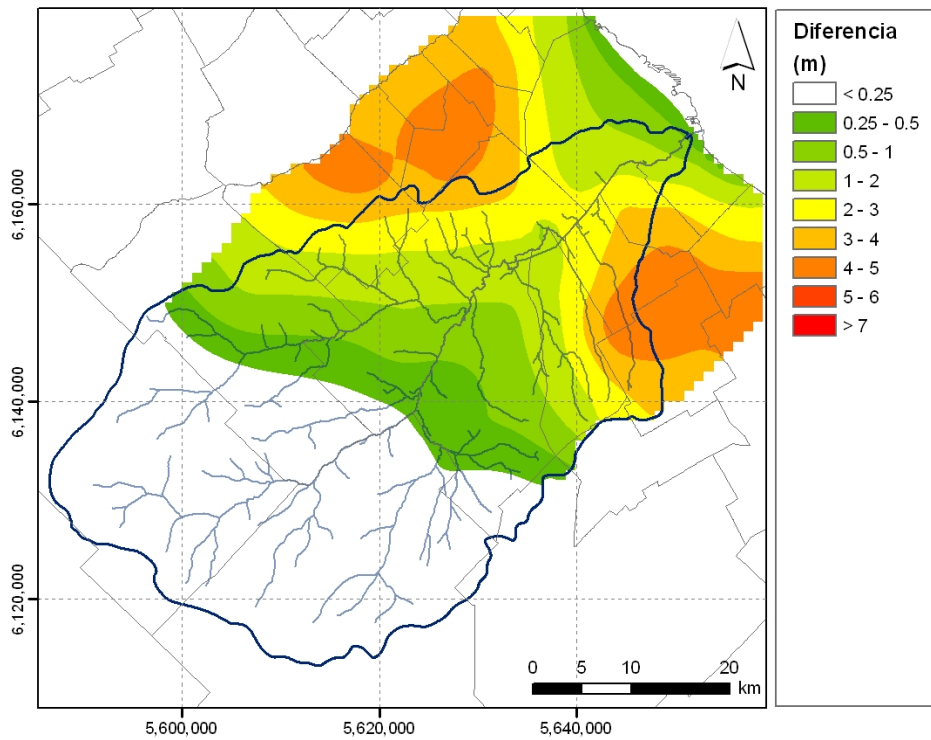


a) Sin aportes a pozos negros

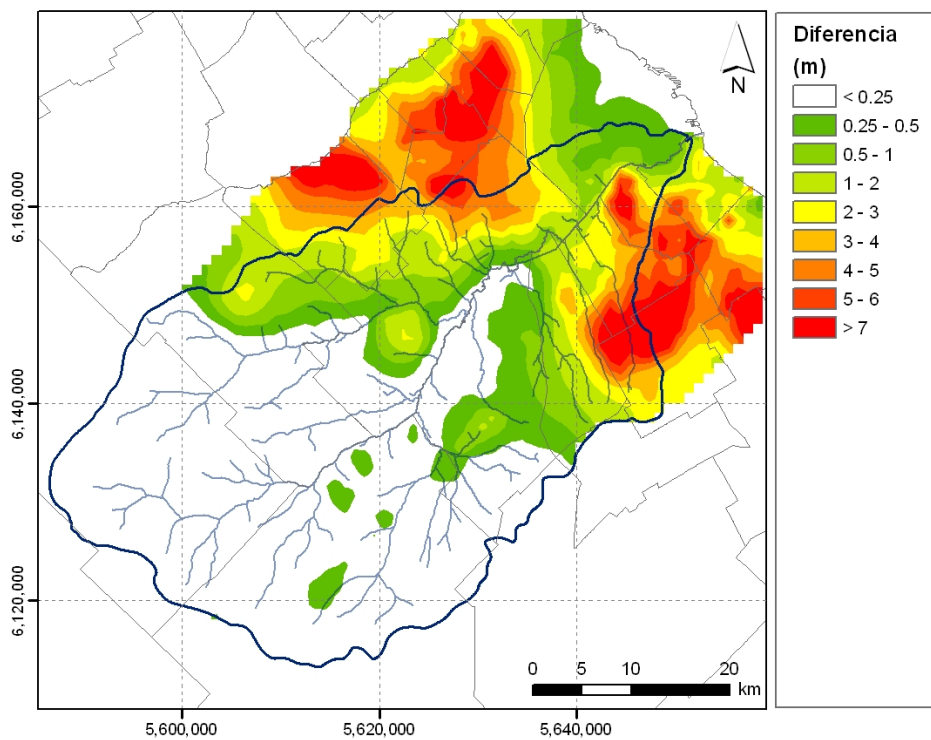


b) Con aportes a pozos negros

Figura 4.4.14. Distribución de niveles piezométricos para el tiempo presente (febrero 2009)

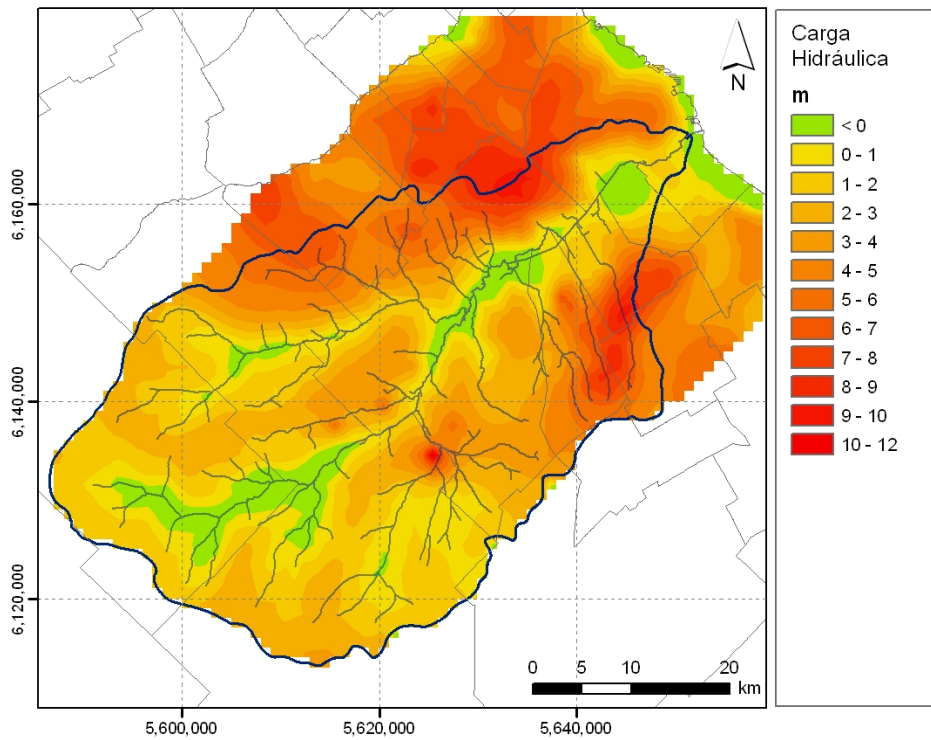


a) Niveles freáticos

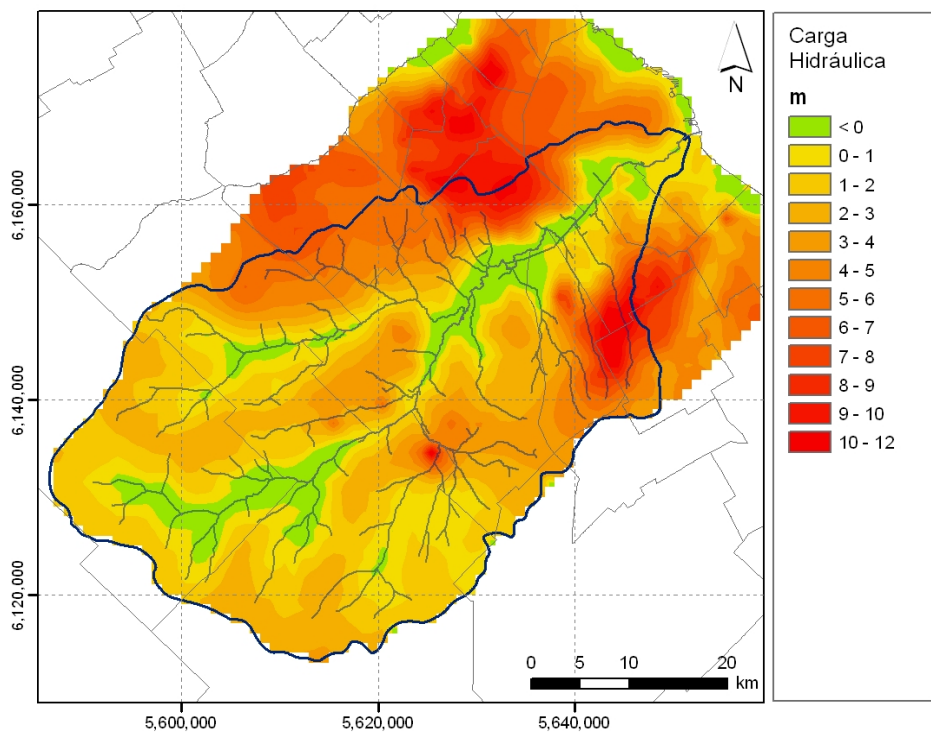


b) Niveles piezométricos

Figura 4.4.15. Diferencia de niveles entre la situación sin y con extracciones de AySA para el tiempo presente (febrero 2009)

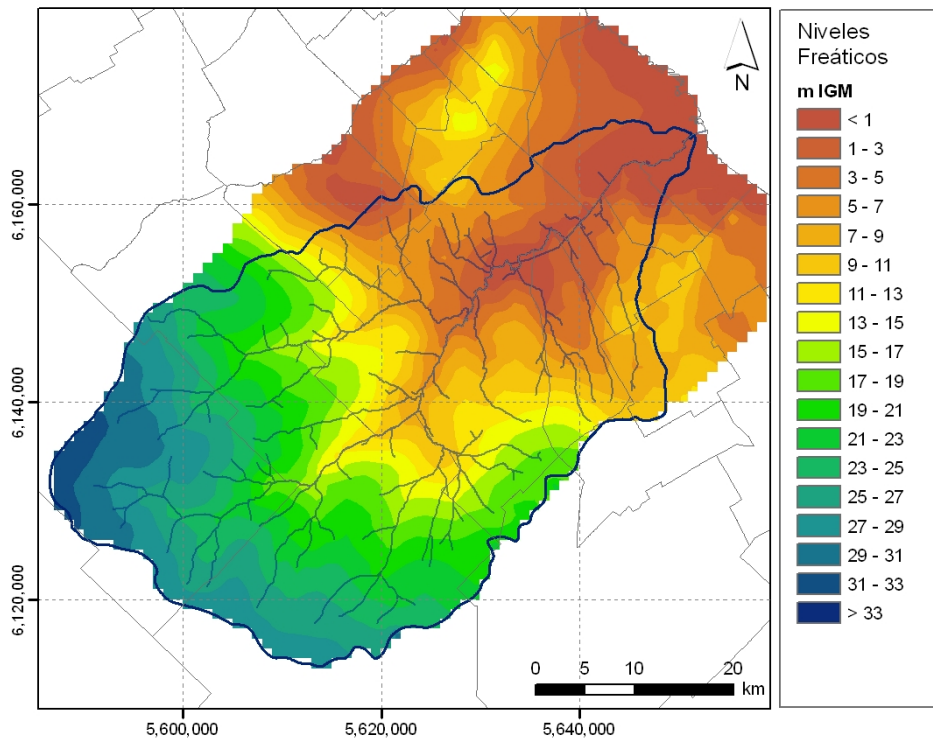


a) Sin aportes a pozos negros

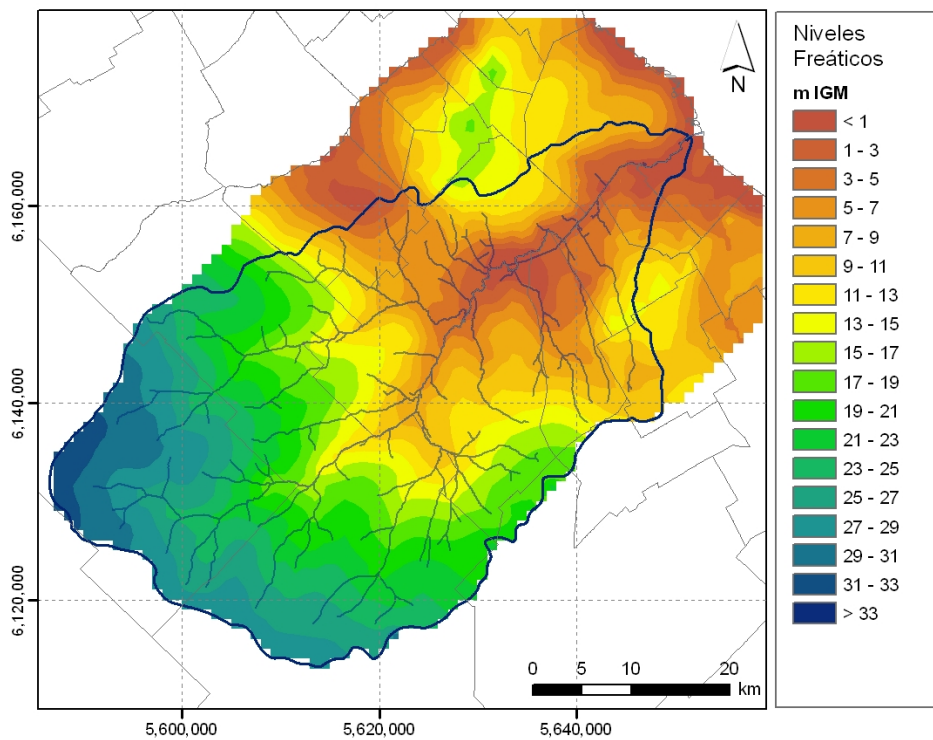


b) Con aportes a pozos negros

Figura 4.4.16. Distribución de carga hidráulica para el tiempo presente (febrero 2009)

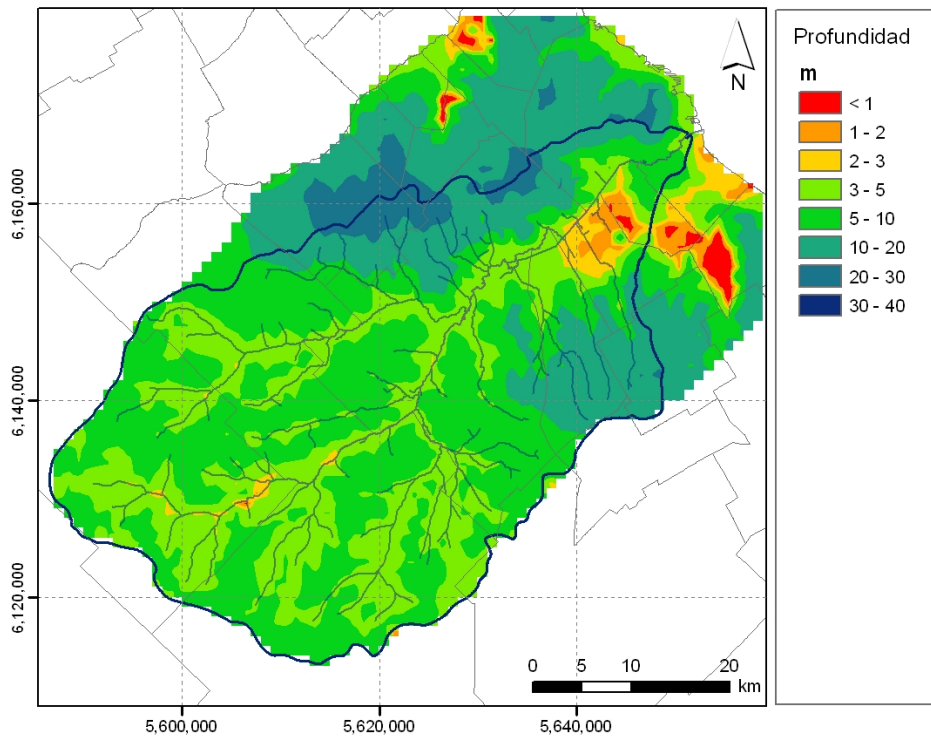


a) Sin pérdidas en la red

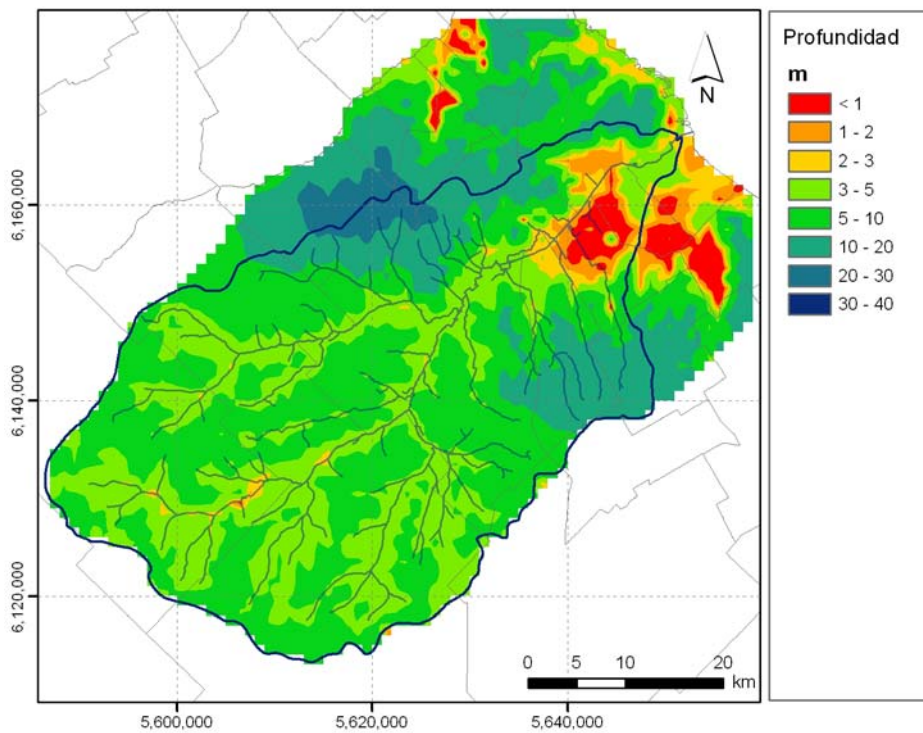


b) Con pérdidas en la red

Figura 4.4.17. Distribución de nivel freático para el tiempo presente (febrero 2009)

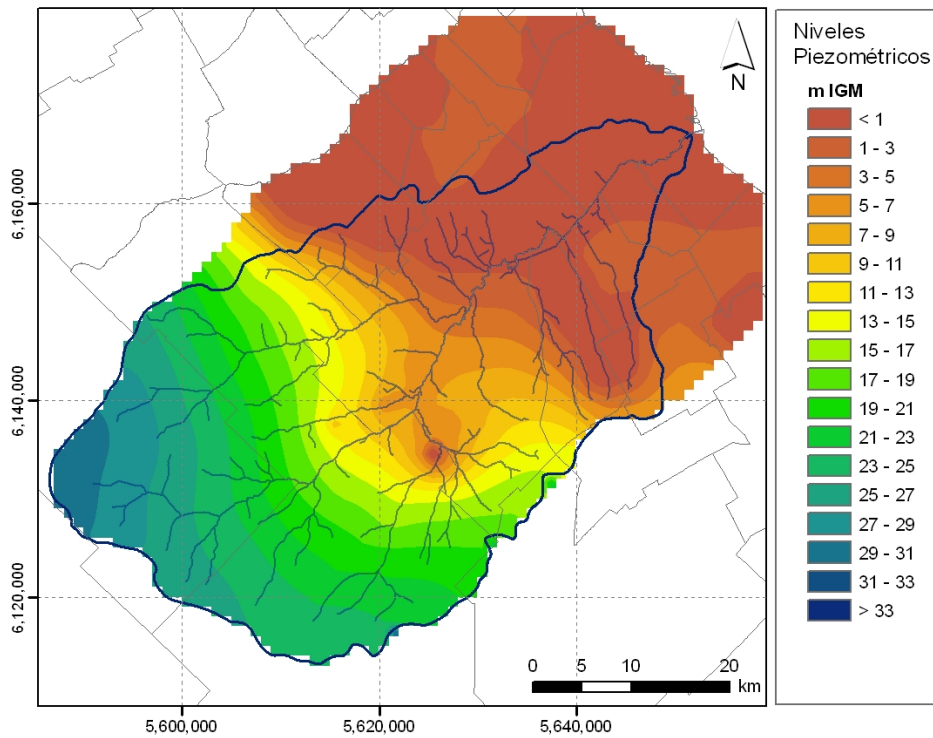


a) Sin pérdidas en la red

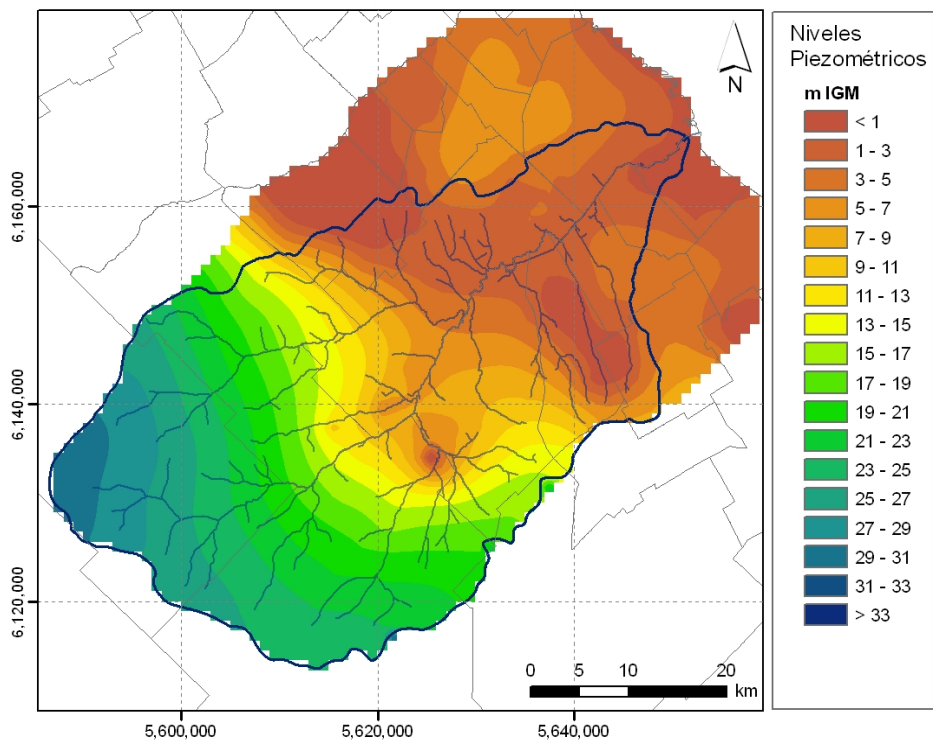


b) Con pérdidas en la red

Figura 4.4.18. Distribución de profundidad freática para el tiempo presente (febrero 2009)

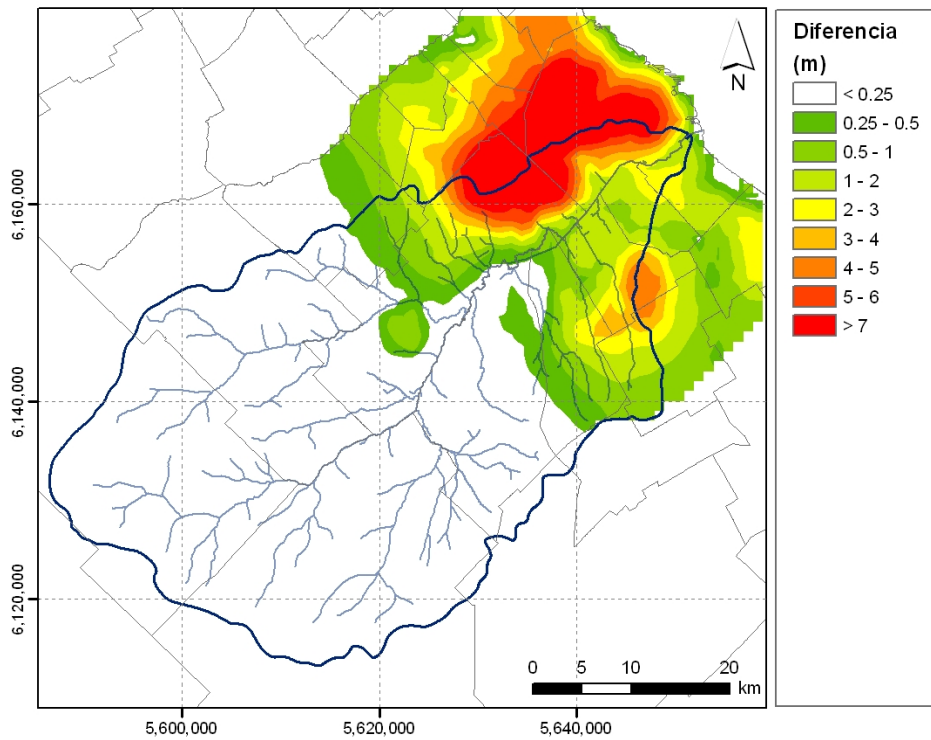


a) Sin pérdidas en la red

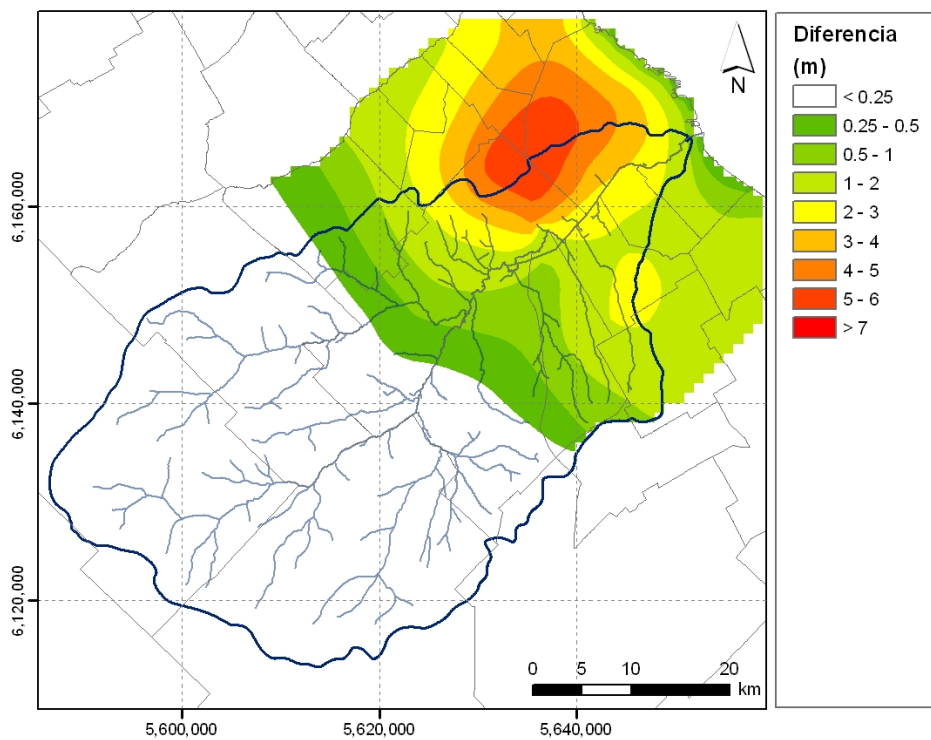


b) Con pérdidas en la red

Figura 4.4.19. Distribución de niveles piezométricos para el tiempo presente (febrero 2009)

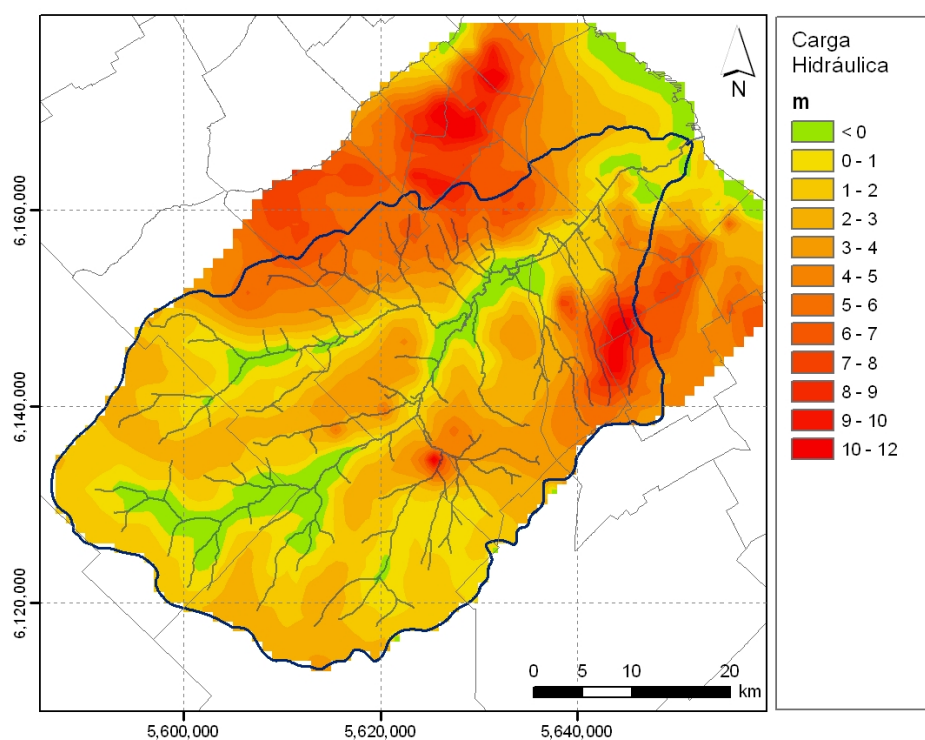


a) Niveles freáticos

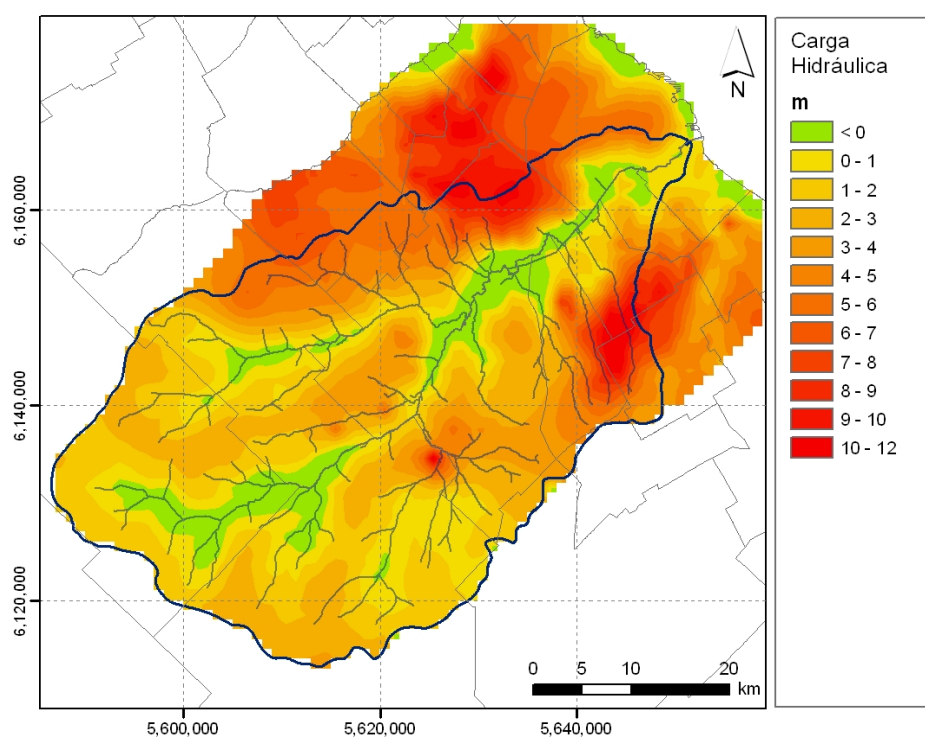


b) Niveles piezométricos

Figura 4.4.20. Diferencia de niveles entre la situación sin y con pérdidas en la red para el tiempo presente (febrero 2009)



a) Sin pérdidas en la red



b) Con pérdidas en la red

Figura 4.4.21. Distribución de carga hidráulica para el tiempo presente (febrero 2009)

4.5 Análisis de problemas

4.5.1 *Napas elevadas en el Conurbano Sur*

Respecto de la problemática de napas elevadas en el Conurbano Sur, tan sensible desde el punto de vista social, los resultados anteriores permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Si bien esa zona ya naturalmente mostraba profundidades relativamente bajas de la freática, la antropización las ha disminuido aún más, tornando mucho más crítica la situación.
- La magnitud de las precipitaciones no es el determinante principal del problema de napas elevadas.
- Los principales determinantes del problema de napas elevadas son los aportes a los pozos negros y las pérdidas en la red de distribución de agua.
- El bombeo de AySA desde el Puelche contribuye a deprimir los niveles freáticos.

4.5.2 *Calidad del agua del Puelche en la zona urbanizada*

Dado que, desde el punto de vista puramente hidráulico, la calidad del agua del acuífero Puelche en la zona urbanizada se ve amenazada por su recarga desde la napa freática, que posee un relativamente alto grado de contaminación, los resultados del estudio conducen a las siguientes conclusiones:

- Las actividades antrópicas han expandido la zona de recarga del Puelche, dejando la descarga hacia el Pampeano limitada sólo a la inmediata vecindad de los cursos de agua.
- Los aportes a pozos negro y las pérdidas en la red de distribución de agua producen un leve aumento de la carga hidráulica, aunque también un leve incremento de la extensión de la zona de recarga.
- Obviamente, el bombeo de AySA contribuye al aumento de la carga hidráulica y la reducción de la zona de descarga del Puelche al Pampeano.

4.5.3 *Efecto de las extracciones industriales*

Los resultados anteriores permiten establecer las siguientes conclusiones respecto del bombeo de las grandes industrias ubicadas en la cuenca media:

- Ese bombeo produce un cono de depresión en el Puelche de un radio de alrededor de 20 km, con disminuciones de nivel en su centro superiores a los 7 m.
- El cono de depresión en el freático es algo menos extenso (radio aproximado de 15 km), pero mucho menos intenso, con depresiones máximas algo mayores a 2 m.

5 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio, en lo que hace a la gestión del agua subterránea en la Cuenca del Matanza-Riachuelo, son las siguientes:

- El efecto neto de la urbanización de la cuenca (impermeabilización de la superficie del terreno, bombeos desde los acuíferos freático y confinado, desbordes de pozos negros, pérdidas en conducciones de agua importada desde el Río de la Plata) ha sido una depresión general de los niveles freáticos y piezométricos respecto de la situación natural. La depresión alcanza a más de 10 metros en el acuífero Puelche, bajo la acción de las extracciones.
- En zonas del Conurbano Sur (dentro de los partidos de Lanús, Lomas de Zamora, Esteban Echeverría y Quilmes) se da el efecto contrario, es decir, una disminución significativa de la profundidad freática. Si bien esas zonas ya naturalmente mostraban profundidades relativamente bajas de la freática, la antropización las ha disminuido aún más, generando una situación crítica para sus habitantes.
- En condiciones naturales, la cuenca se comporta de acuerdo a lo esperado: el acuífero Puelche se recarga desde el Pampeano (freático) en las zonas adyacentes a las divisorias de cuencas, y descarga hacia el Pampeano en las adyacencias de los cursos de agua. En cambio, con la cuenca antropizada actual la zona de recarga del Puelche se ha expandido, dejando la descarga hacia el Pampeano limitada sólo a la inmediata vecindad de los cursos de agua. Además, la carga hidráulica (diferencia entre los niveles freático y piezométrico) ha crecido fuertemente en la zona urbanizada.

- La situación de napas elevadas (profundidad freática menor a 1 m) en el Conurbano Sur se ha mantenido incluso en una condición de pobreza hidrológica como la del año 2008, indicando que la magnitud de las precipitaciones no es determinante para ese problema.
- Los principales determinantes del problema de napas elevadas son los aportes provenientes desde los pozos negros rebalsados y por las pérdidas en la red de distribución de agua. Entonces, la provisión de cloacas (evitando así los pozos negros) y un mayor control de las pérdidas en la red de distribución de agua, serían las dos acciones más efectivas para disminuir significativamente el nivel freático en el Conurbano Sur (sin considerar eventuales obras de drenaje).
- Desde el punto de vista puramente hidráulico, la calidad del agua del acuífero Puelche en la zona urbanizada se ve amenazada por su recarga desde la napa freática, que posee un relativamente alto grado de contaminación. La reducción de los aportes desde los pozos negros y por las pérdidas en la red de distribución de agua contribuirían a disminuir la carga hidráulica, y entonces la recarga del Puelche, aunque su efecto cuantitativo no sería de gran relevancia.
- El cono de depresión en el Puelche, producido por las extracciones de las grandes industrias situadas en la cuenca media, es de relativamente gran extensión e intensidad, tornando costosa la posibilidad de implementar producciones adicionales de agua para consumo humano e industrial. Esto es necesario tenerlo en cuenta a la hora de proyectar urbanizaciones ó parques industriales.
- El modelo desarrollado ha sido utilizado sólo para analizar en forma individual los efectos de cada uno de los factores involucrados en el estado actual de urbanización de la cuenca (impermeabilización, bombeos, pozos negros, pérdidas en conducciones). Pero, obviamente, la potencialidad de la herramienta es mucho mayor, ya que podría ser aplicada para estudiar los efectos de intervenciones conjuntas en el sistema, incluyendo obras de saneamiento, obras hidráulicas, desarrollos urbanos, desarrollos industriales, etc. En particular, resultaría muy útil para indicar la efectividad de acciones de remediación del problema de napas altas en el Conurbano Sur (por ejemplo, obras de drenaje), ó la sustentabilidad de nuevas explotaciones del agua subterránea para uso doméstico o industrial.

Del estudio también surgen las siguientes recomendaciones en relación al modelo desarrollado:

- Si bien la validación del modelo resultó satisfactoria, lo que otorga robustez a las conclusiones obtenidas, sería todavía posible efectuar ajustes en la calibración, de modo de lograr mayor precisión en los resultados.
- Este modelo ameritaría ser mantenido como herramienta de gestión del agua subterránea por la ACuMaR, con ajustes continuos en función de la ampliación de la base de datos (con los monitoreos en ejecución y programados) y de los cambios que se vayan produciendo en el sistema bajo la intervención antrópica.
- Queda pendiente la ampliación del modelo para incorporar el estudio de la calidad del agua subterránea.

REFERENCIAS

1. Amato, D., Silva Busso, A., 2006. Relaciones estratigráficas e hidroquímicas de los acuíferos Pampeano y Puelches en el noreste de la provincia de Buenos Aires. Rev. Mus. Argentino de Cienc. Nat., n.s. 8(1). 9-29
2. Bear J., Verrujit, A., 1987. Modelling Groundwater Flow and Pollution. Reidel Publishing Company, Holland
3. Donigian, A.S. (Jr.), Baker, D.A., Haith, M.F., 1983. HSPF Parameter Adjustments to Evaluate the Effects of Agricultural Best Management Practices, EPA Contract No. 68-03-2895, U.S. EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA, (PB-83-247171).
4. Herrero, A.C., Fernández, L., 2008. De los ríos no me río: diagnóstico y reflexión sobre las Cuencas Metropolitanas. – 1ª ed. – Buenos Aires. Temas Grupo Editorial
5. HIDROAR S.A., 2005. Estudio Hidrogeológico en el establecimiento S.A.F. Argentina.
6. INA, 2003. Estudio para el Diagnóstico del Ascenso de las Aguas Subterráneas en el Conurbano Bonaerense y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Etapa I, Informe Final.
7. Kruse, E., 2007. Estudio para el Diagnostico del Ascenso de las Aguas Subterráneas en el Conurbano Bonaerense y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ACuMaR.
8. Meconi, G., 2004. Flujo de agua subterránea y tendencias de bombeo; en “Vulnerabilidad de la Zona Costera” , A. Menéndez (Ed.). Segunda Comunicación de Cambio Climático de la Argentina al IPCC. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

9. Menéndez, A.N., 2008. Modelación matemática de la Cuenca del Matanza-Riachuelo para el estudio de alternativas de saneamiento, Informe Integrador, Comitente: ACuMaR (Autoridad de Cuenca del Matanza Riachuelo).
10. Santa Cruz, J., Silva Busso, A., 2002. Evolución hidrodinámica del agua subterránea en el conurbano de Buenos Aires, Argentina. Boletín Geológico y Minero, 113 (3), 259-272, IGME.
11. Schaap, M. G., Leij, F. J., 2000. Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. Soil Science Society of America Journal 64, 843-851.