

Modelación del acuífero Guaraní

L. Vives⁽¹⁾, H. Campos⁽²⁾, L. Candela⁽³⁾ y L. Guarracino⁽⁴⁾

(1) Instituto de Hidrología de Llanuras, UNCPB, CC44, 7300 Azul, Argentina.
E-mail: vives@faa.unicen.edu.ar

(2) Centro de Ciencias Exatas e Tecnológicas. UNISINOS, Av. Unisinos, 950, 93022-000 Sao Leopoldo, RS, Brasil.
E-mail: heraldo@euler.unisinos.br

(3) Depto. de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. UPC. Campus Nord, Módulo D2. Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España.
E-mail: lucila.candela@upc.es

(4) Depto. de Geofísica Aplicada, UNLP. Paseo del Bosque S/n, (1900), La Plata, Argentina.
E-mail: luisg@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo preliminar del flujo de aguas subterráneas del Acuífero Guaraní. La modelación matemática se emplea durante la fase de conceptualización del sistema acuífero, como una metodología para verificar y contrastar las diferentes hipótesis de funcionamiento del mismo. Los resultados del premodelo son cualitativamente aceptables, pero evidencian escasez de información y bajo grado de confiabilidad en muchos datos. Parece razonable por los resultados obtenidos, que existe una elevada necesidad de aumentar la información disponible, evidenciado principalmente por las dificultades en ajustar las zonificaciones de transmisividad y las de recarga, y de modelar conjuntamente al Acuífero Guaraní con las formaciones que lo confinan (Sierra Geral y Bauru) más las estructuras que producen flujos preferentes (aulacógenos). El mapa hidrogeológico resulta un excelente elemento integrador de la información hidrogeológica disponible en acuíferos con características regionales y es una herramienta fundamental de apoyo en la modelación. Se propone el empleo del mapa hidrogeológico junto con un banco de datos dinámico y abierto en Internet, como una herramienta para facilitar la toma de decisiones. El presente trabajo pretende contribuir a la planificación de estrategias de protección de las aguas subterráneas y ser una referencia para investigaciones futuras en áreas de mayor complejidad hidrogeológica en las cuencas del Paraná y Chaco-Paraná.

Palabras clave: Acuífero Guaraní, Mapa hidrogeológico, Modelo numérico

Guaraní aquifer flow model

ABSTRACT

This paper presents the results of a groundwater flow model (pre-modeling stage) of the Guaraní Aquifer. Mathematical modeling is used at the conceptual model building step, as a tool to check and verify the several hypothetical hydraulic behavior of the system. The results are qualitatively acceptable, although they put forward the lack of needed data as well as the low confidence on some of them. Given the difficulties in fitting the transmissivity and recharge zones, there is a clear need for additional information as well as the modeling not only the Guaraní Aquifer but also the confining water-bearing formations (Serra Geral and Bauru) and the structural framework where preferential flow may occur. The available hydrogeological map has proved to be an excellent integrating element in large regional aquifers, such as the Guaraní Aquifer, and a fundamental support for modeling. Such a hydrogeological map, along with a dynamic, open, Internet-based database, are proposed as a tool to facilitate the decision-making process. This paper aims at contributing to the management and protection strategies of the regional water resources, and to be taken as a reference of future and hydrologically more complex studies in the Paraná and Chaco-Paraná Basins.

Key words: Ground-water modeling Flow, Guaraní Aquifer, Hydrogeological mapping

Introducción

El Acuífero Guaraní, que está situado entre los paralelos 16° y 32° de latitud Sur y los meridianos 47° y 56° de longitud Oeste (Fig. 1), tiene una superficie aproximada de 1.194.000 km², se extiende por la Cuenca del Paraná en el Sudeste de Brasil (839.000 km²), y por el Este de la Cuenca Chaco-Paraná en terri-

torio de Argentina, Paraguay y Uruguay (355.000 km²). En esta región, con una población de unos 15 millones de habitantes, el acuífero es explotado cada vez con mayor intensidad y constituye la principal fuente de suministro de agua potable para abastecimiento urbano, industrial y agrícola.

El objetivo propuesto inicialmente para este trabajo era simular numéricamente la dinámica del Acuí-

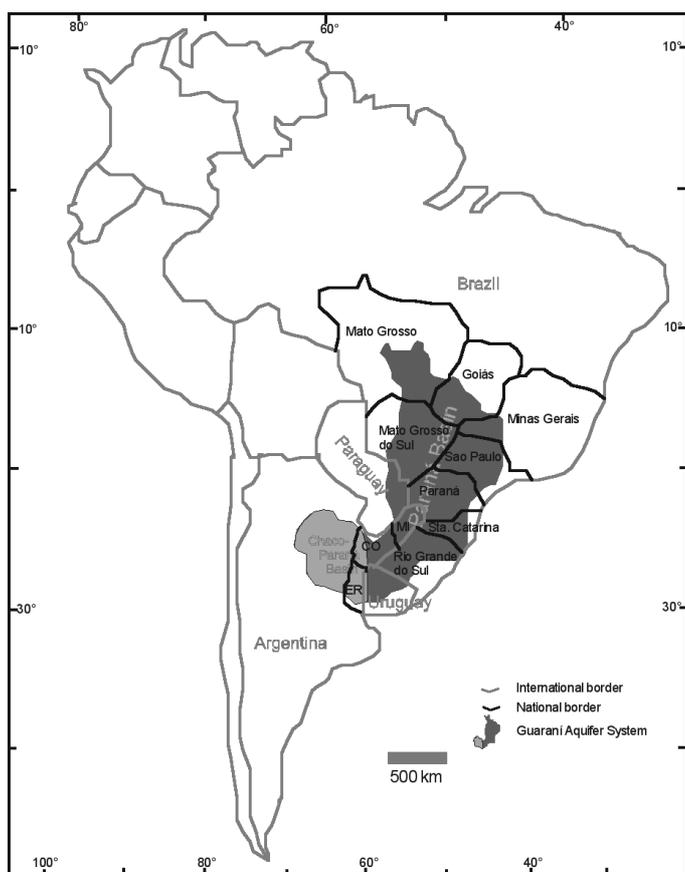


Fig. 1. Mapa de ubicación del Acuífero Guaraní en la Cuenca Paraná y Chaco-Paraná, América del Sur

Fig. 1. Location of the Guaraní acuífer system in the Paraná and Chaco-paraná Basins, South América

fero Guaraní para disponer de una herramienta para la gestión sustentable de las reservas de aguas subterráneas. Sin embargo, las grandes dimensiones del acuífero junto con la escasa o nula información disponible en ciertas zonas y la poca fiabilidad de algunas mediciones, determinaron que el objetivo finalmente adoptado fuera el de emplear la modelación numérica como una herramienta para integrar la información disponible y contrastar diferentes hipótesis sobre el funcionamiento del acuífero. Por esta razón se prefiere denominar a la actividad como pre-modelo aunque por razones de sencillez se referirá en todo el texto al modelo del Acuífero Guaraní.

El Mapa Hidrogeológico del Acuífero Guaraní (Campos, 1999), ha resultado una excelente e imprescindible herramienta de apoyo para la elaboración del modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y durante las tareas de modelación.

Las etapas de modelación realizadas en este trabajo fueron las clásicas: definición del modelo con-

ceptual que permite describir cualitativamente los fenómenos observados; formulación de la estructura del modelo numérico; definición de los elementos del sistema a reproducir; y calibración que permite seleccionar el modelo conceptual más adecuado.

En este trabajo se presenta en primer lugar el mapa hidrogeológico, luego se describe brevemente el acuífero (clima, geología, hidrogeológica, etc.), se presenta el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero -recopilado de varias fuentes- y posteriormente se enseña la estructura del modelo numérico adoptado. La estrategia empleada para la calibración precede a la presentación de los resultados obtenidos, y se culmina con las conclusiones del trabajo.

Mapa hidrogeológico del acuífero Guaraní

El objetivo principal del Mapa Hidrogeológico del Acuífero Guaraní (Campos, 1999) es el ofrecer una visión general y sintética de la distribución de los recursos hídricos, con énfasis en el subterráneo, para ser empleado como herramienta de apoyo para la elaboración del modelo conceptual del funcionamiento del acuífero y para facilitar la toma de decisiones a los organismos administradores del agua.

De acuerdo con estos principios, en la construcción del mapa se realizó un importante esfuerzo de conceptualización e integración de la información hidrogeológica disponible en la área estudiada. Además, se propone que este mapa sea empleado como una herramienta pública de uso general y se sugiere que complementada con un banco de datos dinámicos por Internet, en la forma de un primer paso de un proceso participativo de investigación, difusión, utilización y gestión.

Para la cartografía del acuífero, Campos (1999) empleó unos 50 estudios cartográficos, geológicos, hidrogeológicos y el análisis de más de 200 datos de pozos seleccionados. Los principales estudios hidrogeológicos sistematizados, en ámbito regional, del Acuífero Guaraní están descritos por Rebouças (1976), BRASIL (1983), Araújo *et al.* (1995 y 1999), UNESCO/ CPRM/DNPM (1996) y Rocha (1996 y 1997) para todo el área de dominio del acuífero en la cuenca; DAEE (1974,1976, 1979, 1981, 1982), Silva (1983), Perroni *et al.* (1985) y Campos (1998), para la parte noreste de la cuenca (Estado de Sao Paulo, Brasil); Fraga (1992) (Estado de Paraná, Brasil); Fili *et al.* (1998) y Montaña *et al.* (1998) para territorios de Argentina y Uruguay. Otros autores como Hardy (1998) y Cattáneo *et al.* (1994), describen los aspectos de áreas más restringidas en Uruguay que se abastecen con agua subterránea de este recurso hídrico.

La edición en lengua portuguesa del mapa, escala 1:2.500.000, la realizó la empresa ISOMAPA – Consultoria e Projetos Ltda. (Sao Paulo, Brasil) con el auspicio del CNPq.

Breve descripción del acuífero Guaraní

El Acuífero Guaraní está situado en el sistema fluvial del Río de La Plata, uno de los mayores del mundo (3.100.000 km²). Los hidrogramas muestran una mayor variabilidad temporal para las cuencas ubicadas por encima del Trópico de Capricornio, lo que coincide con el régimen tropical de las precipitaciones. Las mayores descargas se producen entre Diciembre y Abril (máximo en Febrero). Las cuencas ubicadas al sur del Trópico de Capricornio, tienen un régimen diferente, con estiaje en verano y crecidas en invierno-primavera.

El clima abarca diferentes tipos, producto de la extensión del área en latitud y de las variaciones en el relieve. La pluviometría media anual en el período de 1931 a 1960 varía entre 1.000 y 2.400 mm (se observa en general un aumento de la pluviosidad con la altitud). Las temperaturas medias anuales son superiores a 20°C en la mayor parte del área. La evaporación media anual es de 650 a 1.100 mm y la evapotranspiración oscila entre 882 a 1.071 mm/año, o sea, 60 a 70% de la precipitación (Rebouças, 1976).

El área de estudio se encuentra en la Plataforma Sudamericana, cuenca de origen tectónico que puede llegar a superar los 5.000 m de espesor de sedimentos en el extremo Oeste del Estado de Sao Paulo, Brasil. Al final del Jurásico se originó una gran actividad tectónica distensiva, con dos direcciones predominantes, NNE y NW, que dio lugar a la formación de numerosas fallas y pliegues. Paralelamente, tuvo lugar el desarrollo de procesos magmáticos de tipo alcalino, originándose diques y sills de gran potencia (Almeida, 1983).

El Acuífero Guaraní se encuentra confinado en el 90% de su superficie, mientras que el 10% restante tiene características de acuífero libre y constituye su principal área de recarga directa (Fig. 2). El acuífero está formado por areniscas rojas finas a medianas cuarzosas, con granos bien seleccionados y presenta una estratigrafía creciente en profundidad respecto al contenido de arcillas (Lavina, 1991). El espesor del acuífero varía desde unos pocos metros hasta más de 800 m y la profundidad varía desde la zona de afloramiento (cero metros) hasta más de 2.200 en el centro del área. El techo del acuífero (Fig. 3), formado por los basaltos del Acuífero Serra Geral, posee cierta fracturación que, dependiendo de su desarrollo, le confiere

un comportamiento de acuícludo - acuitardo. Sólo en el norte del área la Formación Serra Geral se encuentra confinada por la Formación Bauru. La Formación Piramboia es la base del acuífero.

Con respecto a su geometría, los factores que regulan los límites estructurales del acuífero son cuatro (Araujo *et al.*, 1995): a) Grandes depocentros (donde los depósitos alcanzan una mayor potencia) de lavas basálticas correspondientes a la Formación Serra Geral; b) Activación regional de sistemas de fallas; c) Reactivación de los arcos (Río Grande y Ponta Grossa) y d) Movimientos verticales (levantamientos) de los bordes actuales.

Las aguas del acuífero en las áreas de comportamiento libre, presentan temperaturas comprendidas

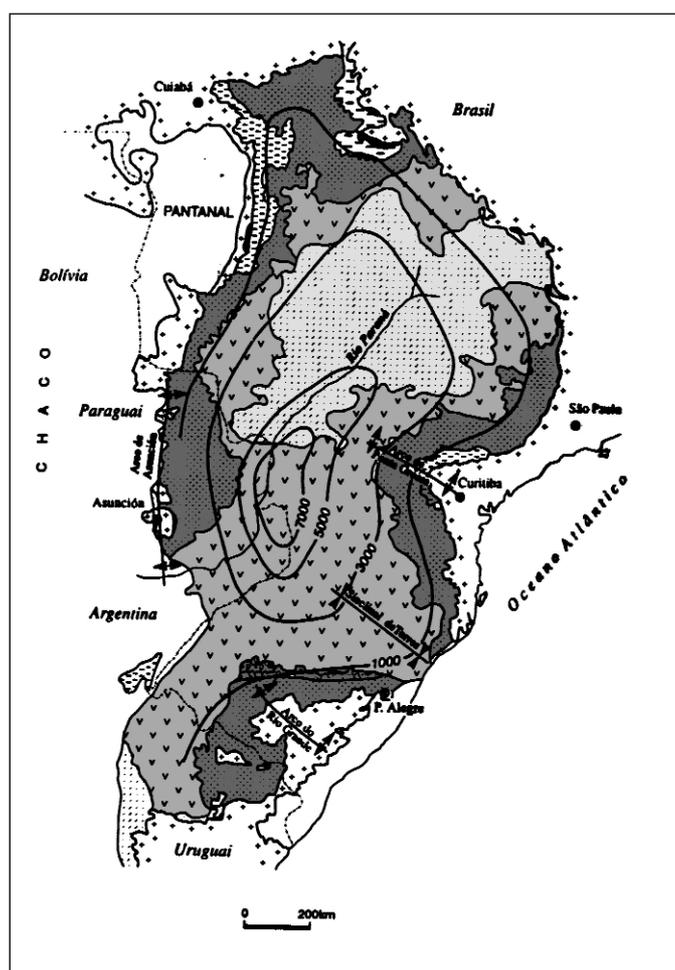


Fig. 2. Mapa geológico simplificado de la Cuenca del Paraná (Milani *et al.*, 1998). El afloramiento del Guaraní es el color gris oscuro, el gris claro es la Formación Bauru y el gris intermedio es la Formación Serra Geral

Fig. 2. Paraná Basin's simplified geological map (Milani *et al.*, 1998). Guaraní Aquifer outcrops are in dark gray, Bauru Formation in light gray, and Serra Geral Formation in regular gray

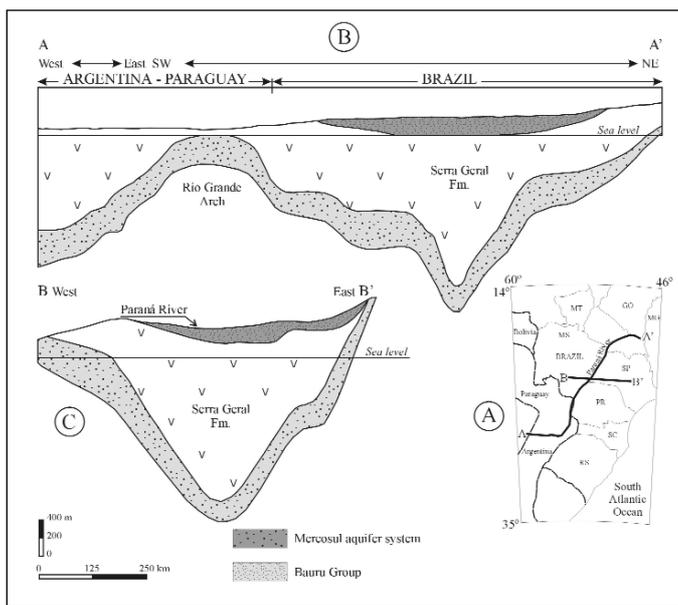


Fig. 3. Cortes longitudinal y transversal del Acuífero Guaraní (Araujo *et al.*, 1999)

Fig. 3. Longitudinal and transverse sections of the aquifer Guaraní (Araujo *et al.*, 1999)

entre 22° y 27°C, pH entre 5,4 y 9,2 y salinidad inferior a 50 mg/l; la facies predominante es la bicarbonatada cálcica, seguida de la bicarbonatada cálcico-magnésica. En el área de características confinadas, la temperatura varía entre 22° y 58,7°C, el pH entre 6,3 y 9,8, y la salinidad entre 50 y 500 mg/l; las facies predominantes, en aproximadamente el 80% de las aguas, son la bicarbonatada cálcica y la bicarbonatada sódica; a éstas le sigue la sulfatada-clorurada sódica.

Modelo conceptual

Debido a la baja densidad de datos y al escaso conocimiento del funcionamiento hidrogeológico, se resolvió eliminar de la zona de estudio el área de afloramiento del Cenozoico indiviso al suroeste de la región. De esta forma el modelo queda delimitado por la zona de afloramiento del Acuífero Guaraní (Sur, Este y Oeste); la zona de descarga del acuífero en la región de la ciudad de Torres (Sureste); el comienzo del afloramiento del Cenozoico indiviso (Suroeste); y la zona donde el acuífero desaparece en forma cuña entre el Acuífero Serra Geral y Acuitardo Passa Dois (Norte). El área total modelada tiene una superficie de 902.636 km², está contenida en la Cuenca Hidrológica del Paraná y abarca territorios en Brasil, Paraguay y Argentina.

El modelo conceptual del Acuífero Guaraní se definió extrapolando a escala regional la estructura preliminar de funcionamiento del acuífero en el Estado de Sao Paulo propuesta por Campos (1998). El Acuífero Guaraní se define como una unidad confinada de areniscas y lamitas con una permeabilidad de 0.2 a 4.6 m/d, que disminuye en profundidad debido al aumento de la proporción de arcillas (Campos, 1999). Las unidades hidrogeológicas que conforman el techo del acuífero son las formaciones Bauru y Serra Geral. La base está delimitada por las formaciones Passa Dois, Tubarao y Precambriano.

Basados en los estudios estructurales de Northfleet *et al.* (1969), Ferreira (1982), Fúlfaro *et al.* (1982), Zalán *et al.* (1991) y Araújo *et al.* (1995 y 1999), el Acuífero Guaraní presenta lineamientos estructurales (aulacógenos) que condicionan el flujo subterráneo. En algunas zonas estos lineamientos actúan como conductos preferenciales de flujo (similar a una fractura) y en otras se manifiestan como una anisotropía en la permeabilidad (fracturación de menor densidad y más distribuida espacialmente).

Las principales entradas de agua al sistema son las recargas por infiltración directa en territorio brasileño, distribuidas espacialmente a lo largo de las zonas de afloramientos en los estados de Sao Paulo, Goias, Mato Grosso do Sul, Paraná y Santa Catarina.

Las áreas de descarga natural del acuífero están localizadas en las regiones de planicies y pantanos ubicadas entre los ríos Uruguay y Paraná; al Sur y Este de la región de Porto Alegre y a lo largo de los ríos Paraná, Pelotas y Tietê, condicionadas por los lineamientos estructurales. Otra salida de agua del acuífero se debe a la explotación de pozos distribuidos en la región Centro-Oeste del Estado de Sao Paulo, con una área de sobreexplotación alrededor de la ciudad de Ribeirao Preto.

Modelo numérico

El modelo de flujo sólo simula el comportamiento del Acuífero Guaraní; no se incluyen las formaciones que lo confinan: Serra Geral y Bauru. La malla de elementos finitos es bidimensional. El régimen temporal es estacionario. Se emplea el sistema de coordenadas UTM y las unidades en que se trabaja son homogéneas, metros y días.

La modelación se ha realizado con el código TRANSIN-II (Medina *et al.*, 1996), que permite simular el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos. Además, este código tiene la excelente ventaja de permitir la estimación automática de todos los parámetros de flujo y/o transporte a partir de valores

medidos de niveles y/o concentraciones. La calibración automática, conocida como problema inverso, se obtiene por métodos estadísticos basados en maximizar la verosimilitud de los errores de la estimación, cuyos detalles se pueden ver en Carrera y Neuman (1986). Para el preproceso y postproceso de datos se realizó con el INTRANSIN-III (Vives, 1994).

Discretización espacial

La construcción de la malla de elementos finitos se realizó automáticamente, mediante el código de generación de mallas 2DUMG (Bugeda, 1990). La Fig. 4 presenta la malla de elementos finitos superpuesta con la referencia geográfica de los países. La discretización de la malla es más fina en las zonas de mayor gradiente hidráulico y/o de mayor densidad de datos como puede observarse en zona noreste del modelo (Estado de Sao Paulo). También se destaca que el tamaño de los elementos aumenta con suavidad al alejarse de estas zonas y acercarse a regiones con gradiente hidráulico bajo y/o poca densidad de medidas.

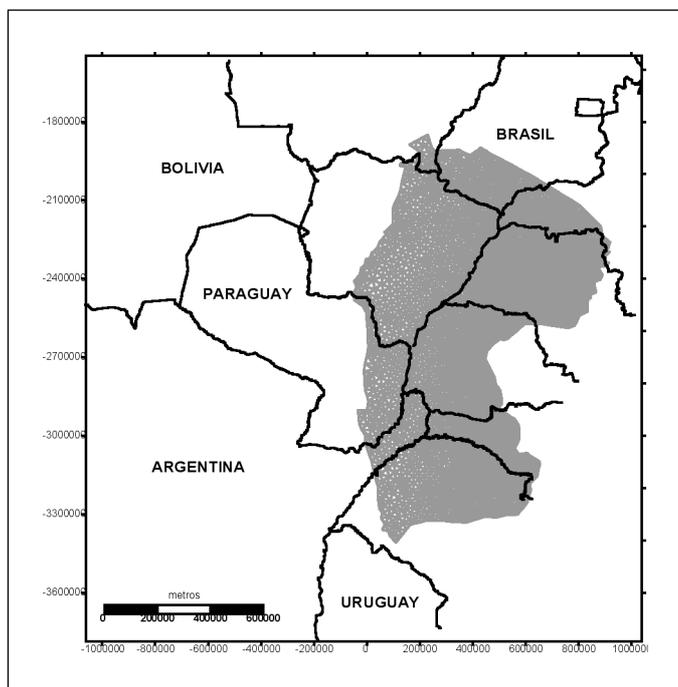


Fig. 4. Malla de elementos finitos del Acuífero Guaraní, con referencias geográficas. La malla tiene 2846 nudos, 5423 elementos triangulares de tres nudos y 304 elementos unidimensionales

Fig. 4. Finite elements grid of the Guaraní Aquifer, with geographical references. The mesh has 2846 nodes, 5423 three-nodes triangular elements, and 304 1-D elements

La malla básica se ha modificado a lo largo de los lineamientos estructurales (aulacógenos), mediante la superposición de elementos unidimensionales que conectan los nodos de ese contorno (coincidentes con aristas de los elementos triangulares) que permiten modelar las direcciones preferentes de flujo.

Zonificación y estimación previa de los parámetros de flujo

En este contexto es importante destacar, en primer lugar, que TRANSIN-II permite asignar a un conjunto de elementos o nudos de la malla propiedades similares, zonificando de esta manera los valores constantes de los parámetros del sistema, como por ejemplo agrupar todos los elementos que componen una parte del dominio con una misma litología. El parámetro asociado a cada una de estas zonas es el resultado de multiplicar un coeficiente que depende del elemento (o nudo) por un parámetro característico de la zona a la que pertenece el elemento (o nudo). El programa estima automáticamente los parámetros de zonas a partir de una estimación previa.

El área de estudio se particionó en 14 zonas de distinta transmisividad y se definieron 6 zonas con diferentes permeabilidades (Fig. 5). La zonificación de la transmisividad permite simular los lineamientos estructurales que actuarían como vías preferentes de flujo (aulacógenos), en tanto que la zonificación de la permeabilidad permite describir áreas afectadas por lineamientos estructurales de poca intensidad (fracturación secundaria).

A partir del trabajo de Ferreira (1982) se definieron las trazas de las zonas de transmisividad. De ese mismo trabajo se obtuvieron los anchos, entre 10 a 20 km, de estas zonas de flujo preferente. Se estimó el valor de la permeabilidad entre 10 a 50 m/d. El producto de esa permeabilidad por el ancho, es el valor de transmisividad que se emplea como estimación previa.

Las zonas de permeabilidad se simulan con los elementos triangulares. La definición de la geometría de estas zonas se ha realizado teniendo presente el grado de fracturación secundaria y algunos lineamientos principales (por ejemplo el de Loanda, coincidente con el Río Paraná) a partir del trabajo de Araújo *et al.* (1995). La fracturación secundaria es simulada conjuntamente con la matriz por lo que estas zonas son tratadas como anisótropas. El tensor de anisotropía tiene la dirección de NNE-SSW, coincidente con el lineamiento de Loanda. El valor de las componentes del tensor de permeabilidad se estimó, según la zona, entre 1 y 24 m/d. Para poder incluir el

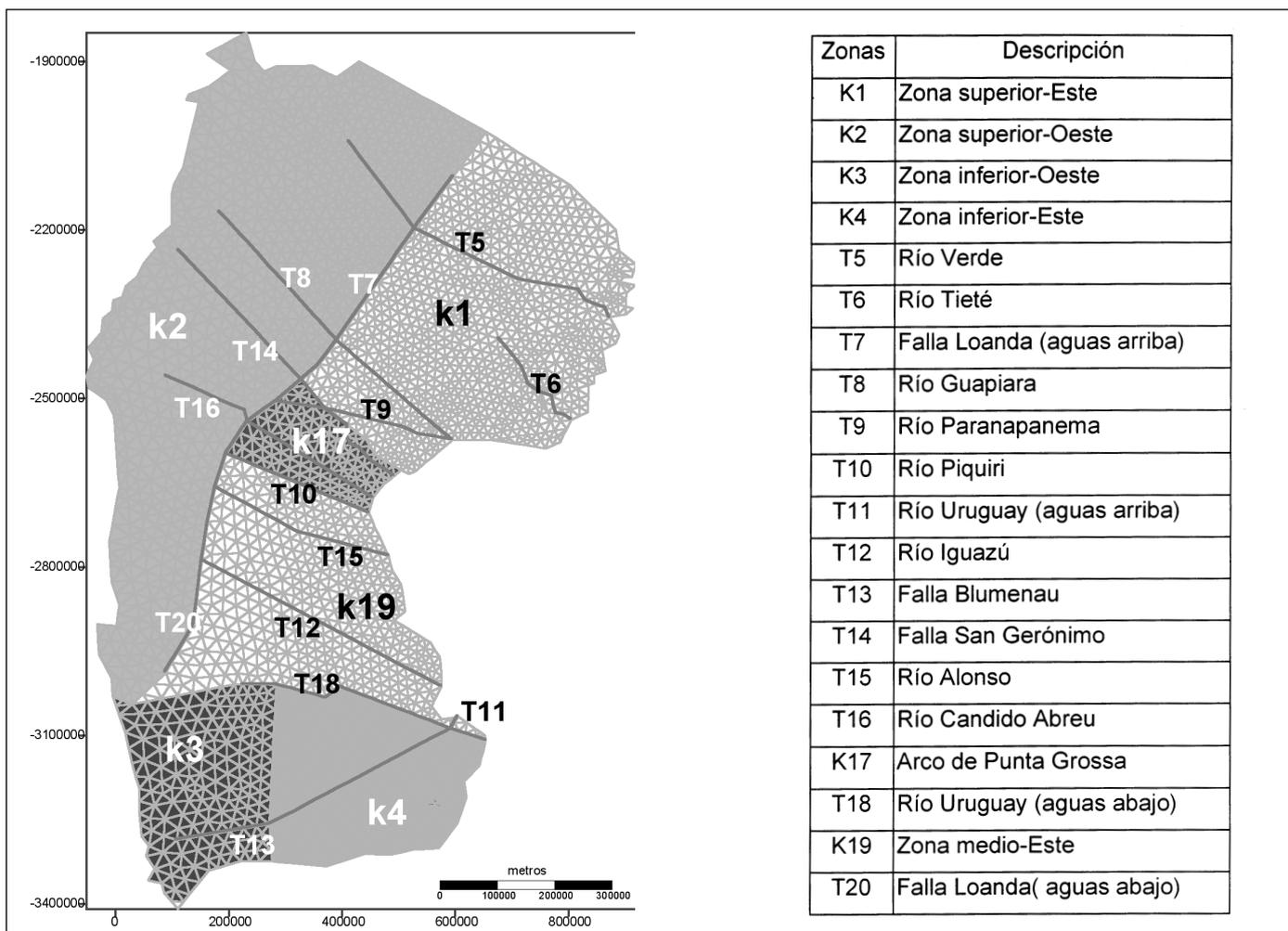


Fig. 5. Distribución de zonas de permeabilidades (K) y transmisividades (T)

Fig. 5. Areal distribution of permeability (K) and transmissivity (T)

efecto de la anisotropía en el modelo se procedió a rotar la malla de modo que la dirección de la anisotropía coincida con el eje de ordenadas.

El valor de los parámetros de permeabilidad y transmisividad es modificado en cada elemento a través de un coeficiente que incluye el efecto de la variación espacial del espesor del acuífero y del cambio de la viscosidad del agua por la variación de la temperatura. El factor que corrige la permeabilidad de acuerdo a la temperatura, se obtiene de la formula de Schneebeli (1966).

La recarga areal (por elementos) se define como una columna de agua que entra o sale de la zona. En el modelo, la recarga es la resultante entre el volumen de agua que entra (por precipitación o recarga del acuífero superior) menos el que sale por las extracciones realizadas por los pozos de explotación.

La infiltración proveniente de la precipitación, para la zona de afloramiento del Acuífero Guaraní, se ha estimado en un 10% de la misma (Rebouças, 1976). La precipitación media anual en la región varía entre 1300 y 1800 mm.

Se conoce desde hace más de dos décadas una sobreexplotación del acuífero en la región de Ribeirao Preto (Sao Paulo, Brasil) con valores de caudales de 45×10^6 m³/año (Gilboa *et al.*, 1976). Los resultados obtenidos del estudio hidrogeoquímico e isotópico de los acuíferos Bauru y Guaraní (Kimmelman *et al.*, 1996) han mostrado que las aguas subterráneas no pertenecen a un único acuífero posiblemente como consecuencia de una alta tasa de bombeo. Existen indicios de la penetración de aguas someras a niveles profundos donde se mezclan aguas geotermales.

La explotación del acuífero en el resto del Estado de San Pablo (Campos y Cerón-García, 1998) se realiza mediante el bombeo de aproximadamente 1.000 pozos situados en su gran mayoría en las áreas donde la potencia del basalto es menor. Los caudales medios se estiman entre 3 y 28 l/s, sin embargo pueden encontrarse algunas decenas de pozos con profundidades próximas a los 1.000 m y caudales entre 80 y 170 l/s.

La recarga se dividió en 7 zonas (Fig. 6). En las zonas donde el acuífero aflora la recarga es controlada sólo por un porcentaje de la precipitación que infiltra (zonas R5 y R6) con excepción de la zona R2 donde además se debe incluir la explotación. En las zonas R3, R4 y R7, todas dentro del Estado de Sao Paulo, la

recarga es negativa porque se tiene en cuenta las extracciones que se realizan en los acuíferos Guarani y Serra Geral (con 3000 pozos que explotan 2.8 m³/s).

La fuente de información para los datos de explotación de las zonas R2, R3 y R4 resulta de una comunicación personal (1999) de Gerôncio Alburque Rocha y José Eduardo Campos del Departamento de Aguas e Energia Elétrica do Estado de Sao Paulo (DAEE). En cambio, los datos para la ciudad de Ribeirao Preto fueron obtenidos del Departamento de Águas e Esgostos de Ribeirao Preto (DAERP).

Las condiciones de contorno en los límites de la zona de estudio se muestran en la Fig. 6. Se han fijado condiciones de nivel fijo en los límites Oeste (zona de Paraguay y del afloramiento del Cenozoico

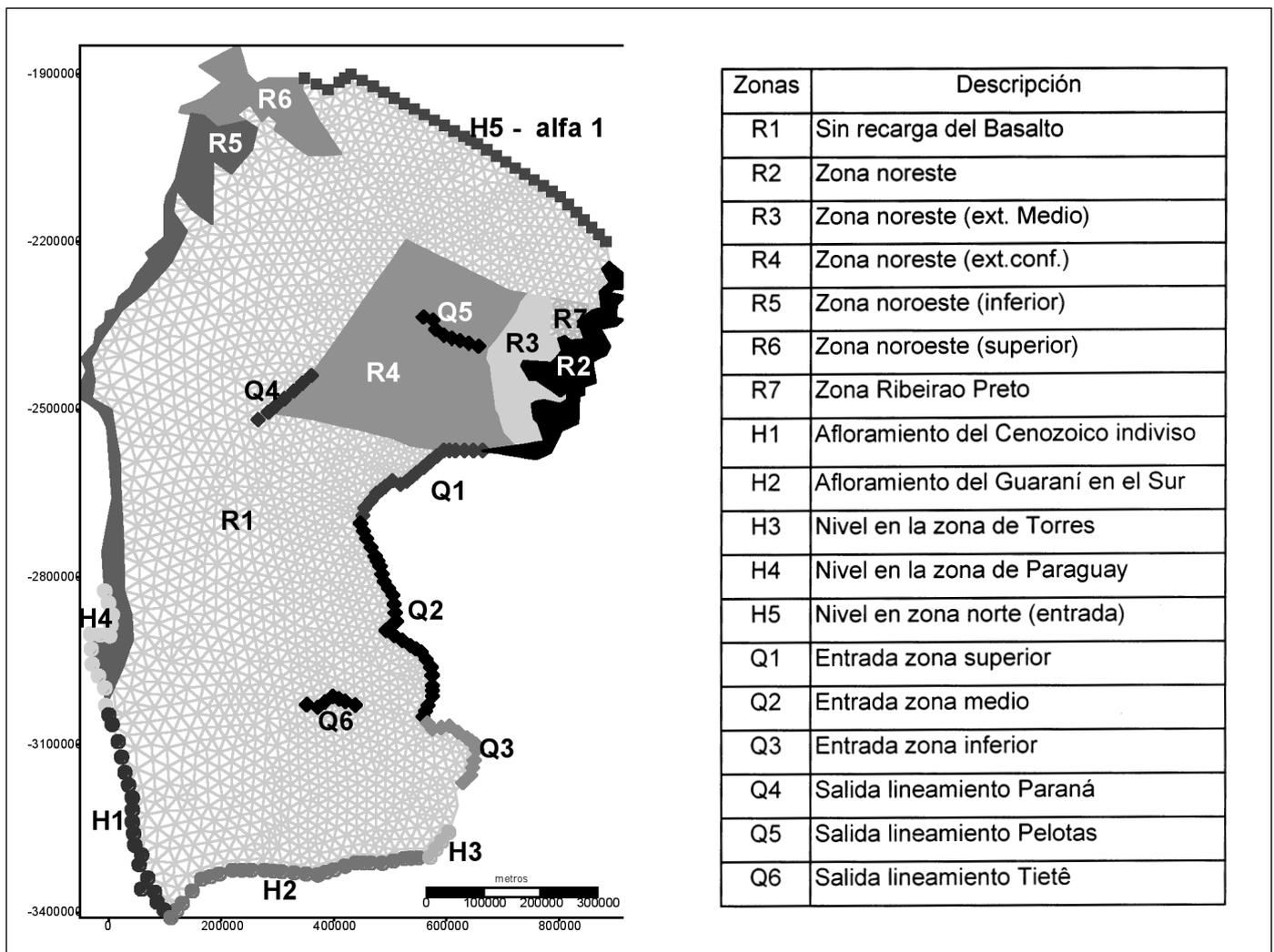


Fig. 6. Distribución de zonas de recarga y de condiciones de contorno. R: Recarga, H: Nivel fijo, Q: Caudal fijo y alfa: goteo

Fig. 6. Areal distribution of recharge and boundary conditions. R: Recharge, H: Prescribed Head, Q: Prescribed Flow and alfa: Leakage

indiviso en Argentina), Sur (afloramiento del Guaraní) y Sureste (zona de Torres); de caudal fijo en el límite Este (zona de afloramiento del Guaraní en los estados de Mato Grosso do Sul, Paraná y Santa Catarina) y condición mixta en la cara Norte de la zona modelada, donde el acuífero termina acuñándose hasta desaparecer.

Las condiciones de nivel fijo pueden corresponder a un valor constante de nivel o variar espacialmente. En las zonas H2 y H3 se adoptó el valor constante del nivel piezométrico. En cambio en las zonas H1, H4 y H5 los valores de los niveles son variables, asignando como parámetro la unidad y como coeficiente del nodo el valor interpolado del mapa de isopiezas propuesto por Araújo *et al.* (1999), ver Fig. 7.

Las zonas de entrada a través de los afloramientos del Guaraní en el contorno Este, son simuladas con

una condición de caudal fijo (zonas Q1, Q2, y Q3). Esta forma de simular la recarga producida por la infiltración del agua de precipitación, en lugar de incluirla como una zona de recarga areal, es porque el ancho de esta franja es muy reducido y derivaría en una malla con elementos triangulares pobremente definidos. El parámetro de estas zonas es el valor de volumen de recarga de precipitación por unidad de longitud. El ancho del área aflorante se adopta de 12.5 km para las tres zonas y el volumen recargado se ha estimado en un 10% de la precipitación (Rebouças, 1976). El coeficiente de nudo son las longitudes medias entre nudos sucesivos.

Las salidas a lo largo de los ríos Paraná, Pelotas y Tietê, condicionadas por los lineamientos estructurales, son simuladas por una condición de contorno de caudal fijo. Las zonas de caudal fijo Q4, Q5 y Q6 tienen como parámetro la unidad y el coeficiente de nudo tiene 100.000 m³/d repartidos proporcionalmente en todos los nudos de la zona. La estimación previa es compatible con los datos de caudal de los flujos superficiales.

Datos empleados en la calibración

Los niveles medidos en una serie de puntos son parte de los datos que requiere el programa. Estos puntos son los "puntos de observación", que coinciden con los pozos en que se dispone de medidas. El número de puntos de observación que se emplearon en este modelo es de 74 (Fig. 8), seleccionados de modo que estén distribuidos espacialmente de forma homogénea y que sean compatibles con el mapa de isopiezas propuesto por Araújo *et al.* (1999).

Algunas de las medidas observadas presentan particularidades que conducen a dudar de su fiabilidad: los días de la toma de la medición no coinciden, la zona de admisión es mayor que el espesor del acuífero (la zona de basalto no está encamisada), pozos parcialmente penetrantes (existe la evidencia de una zonificación por capas del acuífero por el contenido de arcilla), no se tiene certeza que los niveles medidos sean estáticos, etc. Por ello se asignaron unos coeficientes de ponderación a los datos de nivel para valorar su fiabilidad.

Estrategia de la calibración

El proceso de calibración consiste en estimar los parámetros del modelo, de forma que la respuesta del mismo en términos de niveles se ajuste a los valores medidos. Al mismo tiempo, los parámetros calcu-

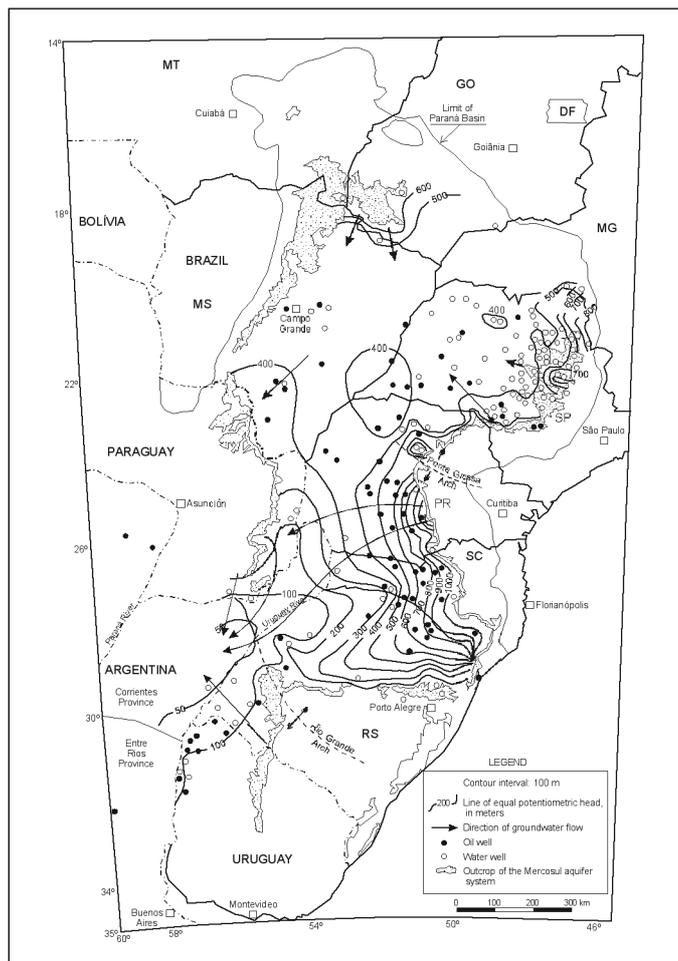


Fig. 7. Mapa de isopiezas del Acuífero Guaraní (Araújo *et al.*, 1999, correspondiente a varios periodos de medición)

Fig. 7. Water-elevation contours of the Guaraní Aquifer (Araújo *et al.*, 1999, corresponding to several surveys)

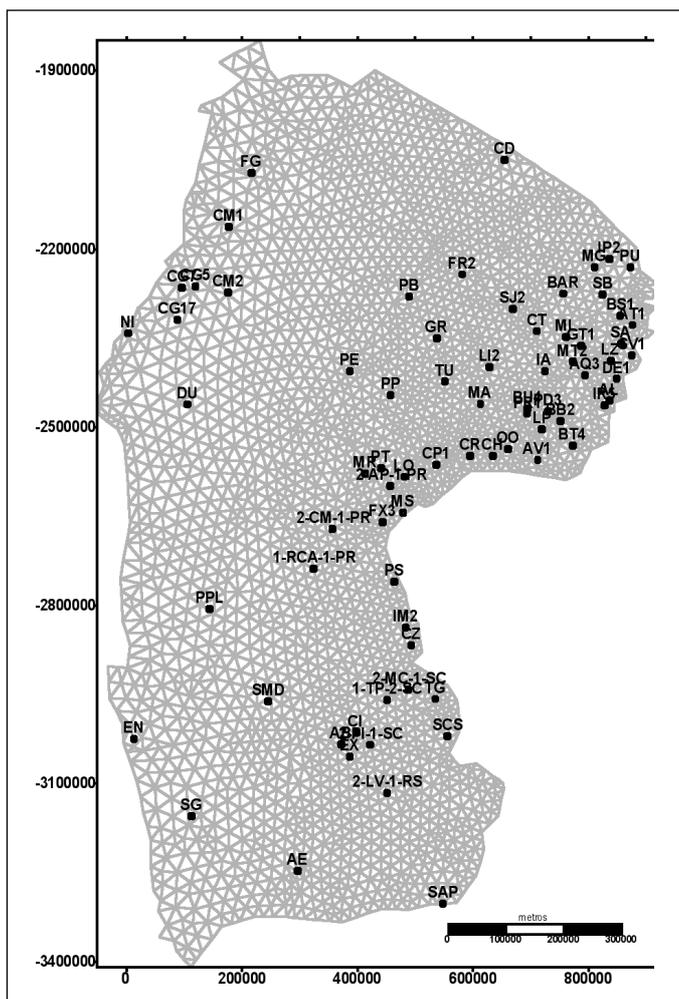


Fig. 8. Puntos de observación empleados en la fase de calibración

Fig. 8. Observation points used in the calibration phase

lados deben ser coherentes con sus estimaciones previas y con el conjunto del modelo conceptual.

Durante la fase de calibración, se impuso como primer objetivo que la piezometría calculada reproduzca cualitativamente las formas del mapa de isopiezas de la Fig. 7.

Este proceso permitió modificar el modelo conceptual de acuerdo con el análisis de los resultados, robusteciendo el esquema del comportamiento del acuífero al acotar algunas de las incertidumbres iniciales del mismo. Los cambios más notorios implementados hasta el actual, que se han presentado en los apartados anteriores, son:

- se comprobó la necesidad de incluir los lineamientos estructurales y de tratar las zonas de permeabilidad como anisótropas, a causa de la fracturación secundaria;

- el análisis de los residuos puso de manifiesto la necesidad de modificar algunas zonificaciones de permeabilidad y el trazado de los lineamientos;
- se comprobó la necesidad de incluir en el modelo las zonas de fuertes extracciones que se realizan en los acuíferos superiores al Acuífero Guarani en la zona del Estado de Sao Paulo (Formaciones Bauru y Serra Geral).

Resultados obtenidos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la calibración, cuyo ajuste puede ser considerado como aceptable y responde satisfactoriamente a los objetivos propuestos.

La Fig. 9 contiene la piezometría calculada por el programa junto con las medidas observadas en los

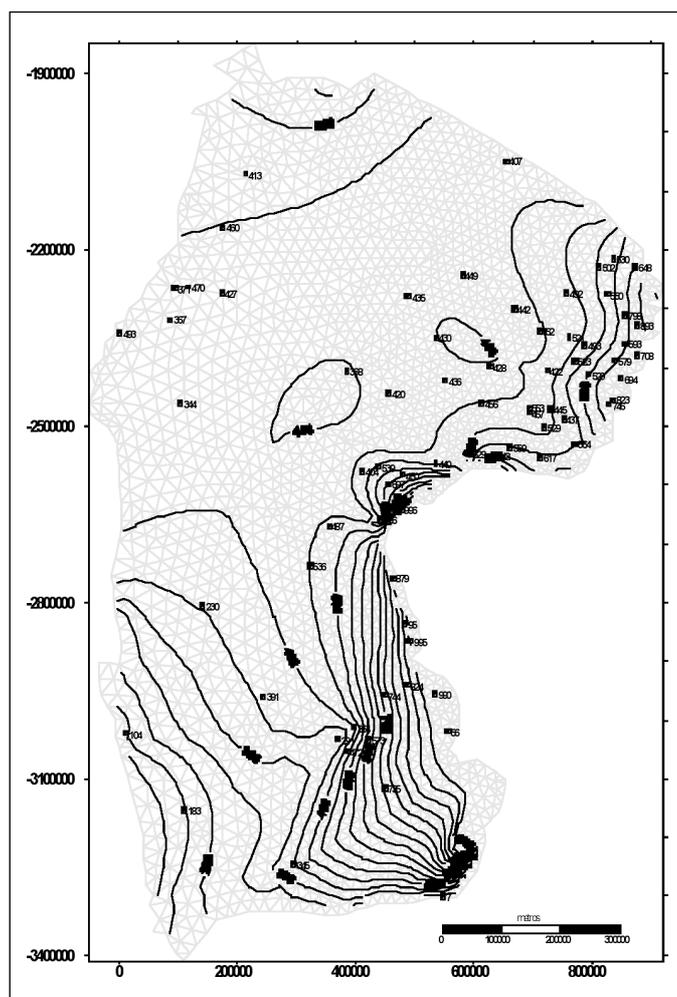


Fig. 9. Isopiezas calculadas en la simulación

Fig. 9. Hydraulic heads computed in the simulation stage

distintos puntos de observación. En ella se puede observar cómo se reproducen cualitativamente las formas de las isopiezas de la Fig. 7 (Araújo *et al.*, 1999), cumpliendo uno de los objetivos propuestos. También se puede observar que el flujo subterráneo está influenciado por los lineamientos estructurales de mayor o menor identidad (aulacógenos) y por las recargas (especialmente en la zona del Estado de Sao Paulo). Asimismo, se puede observar que en la mitad Sureste del modelo no se logra una buena reproducción, por las escasas informaciones disponibles y porque el trazado de las isopiezas en esa región contiene una mayor subjetividad.

Analizando el ajuste por los errores obtenidos en cada uno de los puntos de observación, y entendiendo como error la diferencia entre el valor piezométrico medido y el calculado por el programa, se puede decir que se ha obtenido una desviación típica media de los residuos de 30 m, que es un valor aceptable.

En la Tabla 1 se han representado los valores de todos los parámetros estimados y los resultantes de la calibración. Los parámetros calculados son en general coherentes con el modelo conceptual propuesto y con las estimaciones previas, a excepción de la recarga. Los valores de permeabilidad estimados inicialmente no difieren de los calculados por el programa; están dentro del mismo orden de magnitud y además mantienen la misma relación de anisotropía. Las transmisividades obtenidas para los lineamientos estructurales tienen una mayor incertidumbre, producto de que en el cálculo de la información previa sólo se pudo definir el ancho de estos elementos, aunque sin información del valor de permeabilidad.

La recarga en las zonas de afloramiento del Guaraní (R2, R5 y R6) se reduce, lo que hace suponer que la estimación del porcentaje de infiltración de la precipitación es elevado y/o puede existir una mayor explotación del acuífero. La disminución de la recarga en la zona R4 es esperable ya que la explotación simulada se produce en las formaciones superiores induciendo a que el Acuífero Guaraní entregue parte de su reserva. Por otro lado, se justifica también la necesidad de incluir la sobreexplotación de Ribeirão Preto (zona R7), que parece ser mayor que la estimada a priori.

En la Tabla 2 se presenta el balance estacionario de entradas y salidas del modelo. Se puede observar que todas las salidas del sistema se realizan a través de todas las zonas de nivel fijo, de las descargas de los lineamientos (Paraná, Pelotas y Tietê) y de las zonas de explotación del Estado de Sao Paulo. De ellas destacan por su magnitud y escaso control (no se tiene información para contrastarla) la zona de nivel fijo H4 y las zonas de caudal fijo Q4 y Q5. Las

entradas al sistema se producen por las zonas de afloramiento (R2, R5, R6, Q1, Q2 y Q3). La recarga en R1, que se propone nula, es una condición que se deberá tratar con más rigor, pero ello requiere la inclusión en la modelación de los acuíferos superiores, lo que permitirá determinar la región de artesianismo del Acuífero Guaraní.

Conclusiones

El premodelo numérico de flujo propuesto resulta coherente con la información proporcionada y reproduce cualitativamente las isopiezas calculadas a partir de los datos de campo. La metodología de modelación empleada en este premodelo se basa en compatibilizar-integrar-toda la información existente y la validación de las diferentes hipótesis de funcionamiento del acuífero, con el objetivo de obtener un modelo conceptual general. Sin embargo, el modelo posee algunas limitaciones que deberán ser tenidas en cuenta a la hora de construir un modelo más robusto que reduzca las incertidumbres.

Es importante remarcar que el éxito de un modelado está condicionado por la calidad, densidad y confiabilidad de los datos con que se dispone. En este sentido, es de destacar que las limitaciones más importantes -la mayoría descrita en detalle durante el desarrollo de este trabajo- son: puntos de observación (escasa fiabilidad de las medidas y especialmente mal distribuidos); explotaciones (no se conocen las extracciones en toda la región de estudio); propiedades hidráulicas (valoración); recarga por precipitación (no estudiada en detalle); la falta de incorporación en el estudio de los datos químicos del agua; y la exclusión en la modelación de los acuíferos superiores Bauru y Serra Geral.

Parece ser más razonable el modelar conjuntamente el Sistema Acuífero Guaraní, a través de la construcción de un modelo multicapa o tridimensional (es decir Acuífero Bauru, Acuífero Serra Geral, Acuífero Guaraní-Botucatú y Acuífero Passa Dois) en función de la cartografía hidro-geológica existente e incluyendo los lineamientos estructurales que condicionan el flujo subterráneo.

El mapa hidrogeológico cumple satisfactoriamente el objetivo de ser un elemento integrador de la información hidrogeológica disponible en el área estudiada, como queda reflejado al ser utilizado como una herramienta fundamental de apoyo en la definición del modelo conceptual y en la modelación numérica del Acuífero Guaraní.

Se propone emplear, el mapa hidrogeológico complementado con un banco de datos abierto y dinámi-

Tipo de parámetro	Zona	Nombre	Estimación previa	Valor calculado	Opción de estimación
Permeabilidad	K1	Zona superior-Este	1 3	2.02 4.20	Si Si
Permeabilidad	K2	Zona superior-Oeste	25 10		
Permeabilidad	K3	Zona inferior-Oeste	1 3	2.38 0.17	Si Si
Permeabilidad	K4	Zona inferior-Este	3 1	0.49 0.04	Si Si
Transmisividad	T5	Río Verde	500000	23340	Si
Transmisividad	T6	Río Tieté	500000	1159000	Si
Transmisividad	T7	Falla Loanda (aguas arriba)	100000	98710	Si
Transmisividad	T8	Río Guapiara	200000	489500	Si
Transmisividad	T9	Río Paranapanema	1000000	11490000	Si
Transmisividad	T10	Río Piquiri	1000000	185200	Si
Transmisividad	T11	Río Uruguay (aguas arriba)	100000	349000	Si
Transmisividad	T12	Río Iguazú	100000	52080	Si
Transmisividad	T13	Falla Blumenau	200000	377800	Si
Transmisividad	T14	Falla San Gerónimo	200000	50950	Si
Transmisividad	T15	Río Alonso	200000	51740000	Si
Transmisividad	T16	Río Cándido Abreu	100000	69490	Si
Permeabilidad	K17	Arco de Punta Grossa	5 1	1.49 0.31	Si Si
Transmisividad	T18	Río Uruguay (aguas abajo)	500000	39700	Si
Transmisividad	K19	Zona medio-Este	1	8.32	Si
Transmisividad	K20	Falla Loanda (aguas abajo)	100000	233900	Si
Recarga	R1	Sin recarga del Basalto	0.		
Recarga	R2	Zona noreste	3.49E-04	6.51E-05	Si
Recarga	R3	Zona noreste (ext. medio)	-6.54E-05	-3.86E-05	Si
Recarga	R4	Zona noreste (ext. conf.)	-6.75E-06	-4.30E-07	Si
Recarga	R5	Zona noroeste (inferior)	3.56E-04	5.83E-06	Si
Recarga	R6	Zona noroeste (superior)	5.00E-04	4.65E-06	Si
Recarga	R7	Zona Ribeirao Preto	-6.29E-05	-6.06E-05	Si
Caudal Fijo	Q1	Entrada zona superior	3.000	3.944	Si
Caudal Fijo	Q2	Entrada zona medio	6.164	5.611	Si
Caudal Fijo	Q3	Entrada zona inferior	2.000		
Caudal Fijo	Q4	Salida lineamiento Paraná	-1	-15.3	Si
Caudal Fijo	Q5	Salida lineamiento Pelotas	-1	-3.65	Si
Caudal Fijo	Q6	Salida lineamiento Tieté	-1	-9.96	Si

Tabla 1. Valores calculados de los parámetros y su información previa. Las unidades son metro y día. En parámetro permeabilidad puede corresponder a una zona isotrópica (sólo un valor) o una anisótropa donde el primer valor de permeabilidad corresponde con la dirección paralela al lineamiento de Loanda y la segunda es la dirección perpendicular a la anterior

Table 1. Parameters: calculated and values from previous information. The units are meter and day. Permeability may represent an unique areal isotropy, or an anisotropy where the first value of Permeability corresponds to the direction of the limit of Loanda, whereas the second is normal to the previous one

Número de zonas	Recarga	Nivel fijo	Caudal fijo	Goteo
1		-0.6995	1.0522	0.5030
2	1.3469	-0.1258	2.3080	
3	-0.8001	-0.0109	0.3542	
4	-0.0413	-1.0714	-1.5325	
5	0.2306		-0.3653	
6	0.0980		-0.9959	
7	-0.2500			
Total	0.5841	-1.9077	0.8206	0.5030

Tabla 2. Balance del modelo (hm³/d). Los valores positivos son de entrada y los negativos de salida

Table 2. Model mass balance (hm³/d). Positive values are water inputs, and negative are exiting the system

co en Internet, como una herramienta imprescindible para facilitar la toma de decisiones a los organismos administradores del agua, además de resultar un elemento que incentivara a un proceso participativo de investigación, utilización y divulgación de los conocimientos del acuífero. Incorporar nuevos datos de pozos, información hidroquímica, consideraciones ambientales, aspectos legales y económico-sociales enriquecerán ampliamente esta plataforma.

Agradecimientos

Merecen un agradecimiento especial por su cooperación las siguientes instituciones: Programa Hidrológico Internacional (UNESCO, Montevideo), Universidad do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS, Brasil), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC, España), Instituto de Hidrología de Llanuras (Argentina), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Brasil), Departamento de Aguas e Energía Eléctrica (DAEE, Brasil) y Servei Cartogràfic de Catalunya (España).

Asimismo, un especial agradecimiento a los revisores de este manuscrito por su contribución a mejorar el trabajo inicial. Se agradece las recomendaciones realizadas por el Dr. Eduardo Usunoff (Director del Instituto de Hidrología de Llanuras, Argentina).

Bibliografía

Almeida, F.F.M. de 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas Mesozóicas da região meridional da

Plataforma Sul-Americana. *Rev. Brasileira Geociências*, SBG, 13 (3), 139-158.

Araújo, L. M., França, A. B. and Potter, P. E. 1995. Giant Mercosul aquifer of Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay: hydrogeologic maps of Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones and Tucuaembó Formations. *Biblioteca de Ciência e Tecnologia, Centro Politécnico*, Curitiba, UFPR/PETROBRÁS.

Araújo, L. M., França, A. B. and Potter, P. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal*, 7, 317-336

BRASIL. 1983. *Mapa hidrogeológico do Brasil, escala 1:1.000.000*. Ministério das Minas e Energia/ Departamento Nacional da Produção Mineral. Rio de Janeiro.

Bugeda, G. 1990. *Utilización de técnicas de estimación de error y generación automática de mallas en procesos de optimización estructural*. Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Tesis Doctoral.

Campos, H. C. N. S. 1998. Applied groundwater modeling in the Botucatu aquifer system, Brazil. *8th Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment*, Vancouver, Canada. Proceedings Balkema, Rotterdam, 2359-2366.

Campos, H. C. N. S. y Cerón-García, J.C. 1998. Algunos aspectos de la hidroquímica del sistema acuífero Botucatu (Cuenca del Paraná, Estado de Sao Paulo, Brasil). *Geogaceta*, 23, 23-25.

Campos, H. C. N. S. 1999. *Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guaraní, escala 1:2.500.000* (inédito). Editado por ISO-MAPA – Consultoria e Projetos Ltda. (Sao Paulo, Brasil).

Carrera, J. and Neuman, S. 1986. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions, I, Maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resources Research*, 22 (2), 199-210.

- Cattáneo, O., Hardy, G., Pessi, M. y Royol, R. 1994. Características hidrogeológicas e hidráulicas del sistema acuífero Tacuarembó en la cuenca superior del Arroyo Cuñapirú, Depto. Rivera, R.O. de Uruguay. *II Congreso Latino Americano de Hidrología Subterránea*, Santiago, Chile. ALHSUD, Santiago, 3, 139-150.
- DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). 1974. *Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 6 (Ribeirão Preto)*. São Paulo, GEOPESQUISADORA & TAHAL, 2v.
- DAEE, 1976. *Estudo das águas subterrâneas das regiões administrativas 7, 8 e 9 (Bauru, São José do Rio Preto e Aracatuba)*. São Paulo, ENCO, 4v.
- DAEE, 1979. *Estudo de águas subterrâneas das regiões administrativas 10 e 11 (Presidente Prudente e Marília)*. São Paulo, DAEE, 3v.
- DAEE, 1981. *Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 5 (Campinas)*. São Paulo, DAEE, 3v.
- DAEE, 1982. *Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 4 (Sorocaba)*. São Paulo, DAEE, 3v.
- Ferreira, F. J. F. 1982. Alinhamentos estruturais-magnéticos da região Centro-Oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. *Geologia da Bacia do Paraná, Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos*. São Paulo, PAULIPETRO, 143-166.
- Fili, M., Da Rosa Filho, E.F., Auge, M., Montañó Xavier, J. y Tujchneider, O. 1998. El Acuífero Guaraní. Un recurso compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (América del Sur). *Hidrología Subterránea. Boletín Geológico y Minero*, 109 (4), 389-394.
- Fraga, C. G. 1992. *Origem do fluoreto em águas subterráneas dos sistemas aquíferos Botucatu e Serra Geral da Bacia do Paraná*. São Paulo, IGc/USP. Tese de Doutorado, 178 pp.
- Fúlfaro, V. J.; Saad, A. R.; Santos, M. V. dos Vianna, R. B. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *Geologia da Bacia do Paraná. Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos*. São Paulo, PAULIPETRO, 75-115.
- Gilboa, Y., Mero, F. and Mariano, I.B. 1976. The Botucatu aquifer of South America. Model of an untapped continental aquifer. *Journal of Hydrology*, 29 (1976), 165-179.
- Hardy, G. 1998. El Sistema Acuífero Tacuarembó en la Ciudad de Rivera, Uruguay. *IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Uruguay. Memorias ALHSUD, v.1, 460-468.
- Kimmelman, A., Foster, M. and Coelho, R. 1996. Environmental isotope and hydrogeochemical investigation of Baurú and Botucatu aquifers, Paraná Basin, Brazil. *Isotope Investigations in Latin America*. IAEA, TECDOC 835, 57-74.
- Lavina, E. L. 1991. *Geología sedimentar e paleogeografía do Neopermiano e o Eotriássico (Intervalo Kazaniano - Scythiano) da Bacia do Paraná*. UFRGS, Tese de Doutorado.
- Medina, A., Galarza, G. and Carrera, J. 1996. TRANSIN II. Fortran code for solving the coupled flow and transport inverse problem in saturated conditions. El Berrocal Project. Characterization and validation of natural radionuclide migration processes under real conditions on the fissured granitic environment. European Commission Contract n° F12W/CT91/0080. Topical Report 16. ENRESA.
- Montañó, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Élia, M., Pérez, M., Nagy, M.I., Collazo, P. y Decoud, P. 1998. Acuíferos regionales en América Latina. Sistema Acuífero Guaraní. Capítulo Argentino-Urugayo. *Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión, Universidad Nacional del Litoral*. Santa Fe, Argentina, 217 pp.
- Northfleet, A. A., Medeiros R. A. and Muhlmann, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. *Boletim Técnico PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 12 (3), 291-346.
- Perroni, J. C. A.; Silva, R. B. G.; Hirata, R. C. A. & Dozzi, L. F. S. 1985. Ocorrências de fluoreto nos aquíferos da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. *Simp. Reg. Geol. São Paulo*. Anais. SBG, São Paulo, 2, 503-514.
- Rebouças, A. C. 1976. *Recursos hídricos da Bacia do Paraná*. São Paulo, Tese de Livre Docência, IGc/USP, 143 pp.
- Rocha, G. A. 1996. Mega reservatório de água subterrânea do Cone Sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão: Contribuição ao Seminário e Workshop Internacional do Aquífero Gigante do Mercosul, Curitiba, Paraná, Brasil. Universidade Federal do Paraná (Brasil), Universidad de la República Oriental del Uruguay (Uruguay), Universidad Nacional de La Plata (Argentina), SENASA, International Development Research Centre (Canada), 27pp. (texto de divulgação no evento).
- Rocha, G.A. 1997. O grande manancial do Cone Sul. *Revista Estudos Avançados*, Instituto de Estudos Avançados/ USP, 30 (11), 191-212 .
- Schneebeli, G. 1966. *Hidraulique souterraine*. Editors Eyrolles, París, 362 pp.
- Silva, R.B.G. da. 1983. *Estudo hidroquímico e isotrópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo*. São Paulo, IGc/USP, Tese de Doutorado, 133 pp.
- UNESCO/CPRM/DNPM. 1996. *Mapa hidrogeológico de América del Sur*. Escala 1:5.000.000. UNESCO/Programa Hidrológico Internacional. 2 Mapas. Texto Explicativo. CPRM, Rio de Janeiro, Brasil.
- Vives, L. 1994. *Manual del código INTRANSIN III Versión 2.0*. Barcelona, Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Informe interno.
- Zalán, P. V.; Wolff, S.; Conceição, J. C. J.; Astolfi, M. A. M.; Vieira, I. S.; Appi, V.T.; Zanotto, O. A. and Marques, A. 1991. Tectonics and sedimentations of the Paraná Basin. *Seventh International Gondwana Symposium*. Edited by H. Ulbrich & A. C. Rocha-Campos. Inst. Geoc. USP, Sao Paulo, SP.