

Importancia de la formulación del régimen temporal de flujo en el modelo numérico del Sistema Acuífero Guaraní

A. Gómez^(1, 2), L. Vives⁽³⁾, L. Rodríguez⁽¹⁾ y S. D. S. Cota⁽⁴⁾

- (1) Centro de Estudios Hidroambientales, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, CC 217, 3000. Santa Fe, Argentina
aagomez@fich1.unl.edu.ar
leticia@fich1.unl.edu.ar
- (2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina
- (3) Instituto de Hidrología de Llanuras, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Italia 780, 7300, Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina
lvives@faa.unicen.edu.ar
- (4) Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Brasil
stelacota@gmail.com

RESUMEN

En el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní se desarrolló un modelo regional de flujo de agua subterránea en régimen estacionario que permitió validar diversas hipótesis plausibles de modelos conceptuales, básicamente diferenciados por zonificaciones de la conductividad hidráulica. En este trabajo se analiza la influencia del régimen de flujo (estacionario vs. transitorio) sobre la calibración del modelo regional para un número seleccionado de puntos de observación y los flujos del balance de masa. Adicionalmente se estudia el tiempo de respuesta ante diferentes sollicitaciones externas. Los resultados indican que los efectos del incremento de la explotación son notorios e inmediatos en sitios cercanos al bombeo, mientras que se manifiestan en forma escalonada en el tiempo, aunque de menor intensidad, a medida que uno se aleja del centro de bombeo. A distancias superiores a los 300 km, el efecto del bombeo sería imperceptible, al menos en las condiciones impuestas en el escenario de explotación realizado (100 años).

Palabras clave: cuenca sedimentaria, hidrodinámica, simulación numérica, Sistema Acuífero Guaraní-SAG

The importance of transient flow simulation in the numerical model of the Guaraní Aquifer System

ABSTRACT

A regional groundwater flow model under a steady-state regime has been developed within the framework of the Project for the Environmental Protection and Sustainable Development of the Guaraní Aquifer System. The model has allowed the comparison of several plausible hypotheses concerning different conceptual models, mainly with regard to alternative hydraulic conductivity zoning. We assess here the influence of the flow regime, either steady-state or temporal, on the magnitude of hydraulic conductivity and the water balance. The response time to various external stresses is also analyzed. The results indicate that the effect of increasing pumping is immediately noticeable close to pumping wells whilst the effect manifests with a lag time, though less intensively, as the distance from the pumping centre increments. The effect of pumping would be imperceptible 300 km away, at least for the simulated conditions in a 100-year scenario.

Key words: Guaraní Aquifer System, hydrodynamics, numerical simulation, sedimentary basin

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

The Guaraní aquifer system is the largest transboundary aquifer in South America. It extends for some 1,200,000 km² beneath four countries: Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay (Fig. 1). It is contained within sandstones

and confined by basalts over more than 90% of its extent. A regional groundwater flow model under a steady-state regime has been developed within the framework of the Project for the Environmental Protection and Sustainable Development of the Guarani Aquifer System, PSAG (PSAG, 2009; Vives et al., 2008). Besides being useful as tools to assess the validity of the conceptual hydrogeological model, numerical models are convenient instruments for analysing the dynamic response of groundwater systems to changes in external stresses, which may come about because of fluctuations in recharge due to changes in the precipitation regime, or else an increase in groundwater exploitation. The steady-state model of the GAS permitted a comparison of several plausible hypotheses concerning different conceptual models defined through alternative hydraulic conductivity zonings. We examine here the influence of the flow regime, either steady-state or temporal, on hydraulic conductivity and the water balance. The response time to various external stresses is also investigated.

The implementation of numerical and conceptual models

The findings of the PSAG lead to an operative separation of the aquifer into pre-GAS, GAS and post-GAS formations, assuming the geologic and hydraulic continuity of the aquifer, as can be seen in Figure 2. Pre-GAS formations tend to be Permian sediments of various types whilst the GAS sediments include Cretaceous-Jurassic sandstones and post-GAS rocks comprise basalts and quaternary deposits. LEBAC (2008) postulated that the regional groundwater flow trends from north to south, with the aquifer possibly divided into four domains related to the basin's main structural features: the groundwater in the northeast domain (NE) flows towards the the Paraná River; the east domain (E) is separated from the NE by the Ponta Grossa arch, which causes an east-west flow; whilst the west domain (W) works as an isolated system, with recharge-discharge areas associated to zones of sandstone outcrops. Flows from these three domains, which are not discharged to the west, converge on the axis of the central basin, hence connecting to the south domain (S), located to the south of the Asunción-Río Grande dorsal. These structures were not explicitly included in the numerical model although the influence of their flow patterns was simulated indirectly by choosing hydraulic conductivity zones based on these hydraulic definitions.

The boundary conditions proposed for the GAS are shown in Figure 3 in terms of a combination of no-flow, recharge and discharge zones, with recharge applying to outcropping areas. The current conceptual model does not include indirect recharge/discharge to or from the GAS either from the confining basalts or vertical flows deriving from underlying formations.

The potentiometric map (Fig. 3) was constructed mainly with levels measured when the boreholes were drilled and therefore they represent a time window of 20 to 30 years from 1970.

Methods

Numerical simulations were made with TRANSIN, a finite-element code that solves groundwater flow and transport equations. TRANSIN contains a powerful automatic calibration algorithm for all parameters. Figure 4 shows the modelled area, reticulated into 46,862 triangular elements with 23,890 nodes, with a mean element area of 25 km². The GAS was simulated as a single continuous layer of sandstones with no interaction with neighbouring layers. Hydraulic conductivity (K) was divided into 31 zones according to one of the criteria used in Vives et al. (2008), taking into account the piezometric map and the analysis of hydraulic gradient changes. K values were corrected for temperature according to Schneebeli's formulae, resulting in values of up to three orders of magnitude higher than the point values estimated at surface temperature. Recharge was simulated over outcropping areas and its rate was defined as a percentage of the mean annual precipitation, assuming a mean annual precipitation gradient in a north-south direction from 2,000 mm/yr in the north to 1,600 mm/yr in the south. Local and regional discharges were simulated through the model boundaries and some water courses in contact with the aquifer, as shown in Figure 4. Simulated pumping, distributed among 20 pumping zones, reached 1,040 hm³/yr (Fig. 5).

Results and Discussion

Case 1: The influence of flow regime on calibration and mass-balance terms

Theoretically, a steady-state simulation should represent the state of the system before exploitation, or at least when the rate of pumping does not affect the natural system. A transient simulation is performed subsequently, incorporating the effects of exploitation progressively as pumping increases. Regrettably, according to the PGAS, temporal information was unavailable and so the pumping estimation is only an approximation of the current situation.

The steady-state simulation was called Case 1A and includes exploitation. The calibration strategy consisted firstly in automatically calibrating K using 114 observed groundwater levels to obtain satisfactory agreement between calculated and simulated levels, and K values consistent with our knowledge of the aquifer. The K zones and calibrated values are set out in Figure 7. In Case 1A the K values covered a range of between 0.9

m/d and 35 m/d, with higher values in Zones 3 and 27, located in the north-central region of the model area. Except in a few zones, due to scale effects the calibrated values were higher than those expected for sandstones (Martínez Landa, 2005).

The transient simulation was performed for a 38-year period (1960-1997) using the K zoning of Case 1A and an annual time step. This new case was called Case 1B. The first time step was set as steady-state without exploitation. For the following time steps a temporal function was used for the recharge rate, representing anomalies in mean annual precipitation. The temporal function thus defined (Fig. 6) was applied in each outcrop area, with different rates depending upon their geographical location. Pumping was assumed to be constant for the whole transient simulation. The model was calibrated by comparing observed vs. calculated values in the final time step. In general some K values in each zone were higher than those in Case 1A, although some were the same and others even lower (Figure 7). Figure 8 shows the observed vs. calculated levels for both the steady-state and transient simulations. Simulated levels were within the calibration target. In Case 1A the mean error was 44.41 m, whilst in Case 1B it was slightly lower at 41.26 m. Qualitatively the simulated potentiometric map for both cases outlines the flow patterns defined in the conceptual model (Fig. 9).

Tables 1 and 2 compare the mass-balance flows for both simulations, confirming that flows through the systems are low compared with storage volume and the minimum flows of the Paraná and Uruguay rivers.

Case 2: Analysis of the model's response to different stresses

In this case, the effects of an eventual increase in pumping rates were studied for the K zonation of Case 1A. Pumping was increased along a thermal corridor in Argentina and Uruguay (pumping zone 2) and in the western region of Sao Pablo (zones 14, 15, 16, 17 and 18) (Fig. 5). Three transient simulations were performed for a 100-year period with an annual time step: 1) maintaining present-day pumping (Q_{actual}); 2) doubling present-day pumping ($2Q$); and 3) tripling present-day pumping ($3Q$), whereas the rest of the parameters of the model were kept unchanged. A temporal function for recharge was defined from the 1901–2001 monthly precipitation series obtained from CRU data (Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, England) (Fig. 10). Drawdowns in response to pumping in all three scenarios were analysed at observation points, the sites of which are shown in Figure 11. Figure 12 presents the calculated hydrographs for representative observation points.

The results indicate that the effect of increasing pumping is immediately noticeable close to pumping wells (observation points PVIR-01 and PVIR-02), whilst the effect manifests with a lag time, though less intensively, as the distance from the pumping centre increments. The effect of pumping would be imperceptible 300 km away, at least for the simulated conditions over a 100-year scenario.

Introducción

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es el acuífero transfronterizo más extenso de Sudamérica. Se extiende sobre 1.200.000 km² bajo cuatro países: Brasil, Argentina, Paraguay, y Uruguay (Figura 1). El acuífero está contenido en areniscas, confinadas por basaltos en alrededor del 90% de su superficie. Las areniscas afloran a lo largo de los bordes del acuífero, profundizándose hacia el centro de la cuenca tectónica, alcanzando espesores de 600 m y profundidades de 2200 m. El SAG contiene un volumen de agua considerable, sin embargo su magnitud no es aún conocida con precisión, por lo que es complejo cuantificar el impacto de la explotación actual del acuífero. Este es un tema sensible debido a que se trata de un recurso compartido por cuatro países.

A fin de analizar este y otros aspectos, los cuatro países desarrollaron el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del SAG (PSAG), un gran esfuerzo multidisciplinario que culminó en 2008 con la elaboración de diversos productos técnicos y un Programa Estratégico de Acción (PSAG,

2009). Uno de los productos del PSAG fue el modelo numérico regional del funcionamiento hidrodinámico del acuífero (Vives et al., 2008).

Los modelos numéricos son una importante herramienta para validar modelos conceptuales de funcionamiento hidráulico de acuíferos, pero además permiten analizar la respuesta dinámica del sistema de flujo subterráneo ante variaciones de las solicitaciones externas por incremento de los volúmenes de explotación y/o por fluctuaciones de la recarga por efecto del régimen de precipitaciones. En el marco del PSAG, se implementó el modelo regional de flujo de agua subterránea en régimen estacionario, lo que permitió validar diversas hipótesis plausibles de modelos conceptuales, básicamente diferenciados por zonificaciones de la conductividad hidráulica. En este trabajo se analizan dos aspectos relativos al régimen transitorio: 1) Influencia del régimen de flujo (estacionario vs. transitorio) sobre la calibración del modelo regional para un número seleccionado de puntos de observación y los flujos del balance de masa; y 2) Análisis de la respuesta ante diferentes solicitaciones externas.



Figura 1. Localización del SAG (Modificado de LEBAC, 2008).
Figure 1. Location of the GAS [taken from LEBAC (2008), with modifications].

Área de estudio - modelo conceptual

El modelo conceptual representa la hipótesis de funcionamiento del sistema, y por ende es de carácter cualitativo. Se construye integrando la información geológica, estructural, geofísica, hidrológica/hidrogeológica, hidroquímica e isotópica. En el caso del SAG, además de la información antecedente, se incorporó la generada durante la ejecución del proyecto. Por ende el modelo constituye una nueva y mejorada conceptualización del funcionamiento del SAG respecto a las anteriores (Rebouças, 1976; Araújo et al., 1999; Campos, 2000).

Dentro del PSAG se adoptó un criterio de separación operativa de las formaciones, donde las unidades litoestratigráficas principales que constituyen el Sistema Acuífero Guaraní son las areniscas de la Formación Misiones en Argentina y Paraguay; las areniscas de la Formación Tacuarembó en Uruguay y Argentina, y en el territorio brasileño las formaciones Botucatu y Pirambóia, esta última fundamentalmente en la porción norte, y las formaciones Guará, Caturrita y Santa María en la porción sur del territorio

brasileño (LEBAC, 2008). Otra de las hipótesis básicas del modelo conceptual es la continuidad geológica e hidráulica del SAG, tal como se aprecia en los perfiles de la Figura 2. Sin embargo otros autores (Campos, 2000; Rosa Filho et al., 2003; Machado y Faccini, 2004; Soares, 2008) postulan la presencia de compartimentación geológica definida por la presencia de lineamientos que no necesariamente implican discontinuidades hidráulicas dado que las formaciones infra/suprayacentes pueden ser buenas conductoras de agua en diferentes sectores.

En este sentido LEBAC (2008) afirma que, regionalmente, el flujo subterráneo del SAG presenta una tendencia en dirección Norte – Sur, acompañando el eje de las cuencas sedimentarias Paraná y Chacoparanaense, donde pueden ser reconocidos 4 grandes dominios hidrodinámicos, Noreste (NE), Este (E), Oeste (O) y Sur (S), relacionados directamente con las características estructurales de la cuenca. El dominio NE presenta un flujo en dirección al Río Paraná; el dominio E está separado del dominio NE por el Arco de Ponta Grossa (ver Figura 3) cuyos diques funcionan como una barrera hidráulica que condiciona la dirección preferencial de flujo en sentido E-O; el dominio O funciona como un sistema aislado, con zonas de recarga y descarga asociadas a zonas de afloramientos mostrando una divisoria de aguas subterráneas. El flujo de estos tres dominios que no se dirige al límite oeste converge al eje central de la cuenta, a lo largo del Río Paraná y se conecta con el cuarto dominio, dominio Sur (S), localizado al sur de la dorsal Asunción – Río Grande. Si bien las diferentes estructuras regionales que condicionan esta compartimentación no fueron incorporadas explícitamente en el modelo numérico, los criterios utilizados en la zonificación de la conductividad hidráulica se basaron en las diferencias de gradiente hidráulico observadas atribuidas, entre otros factores, a dichas estructuras.

De acuerdo con la interpretación de LEBAC (2008), los mayores espesores del SAG, de aproximadamente 600 m, se encontrarían en territorio brasileño al oeste de la denominada “calia” central mientras que los mínimos se ubicarían a lo largo de la dorsal Asunción/Río Grande hacia el norte. Esto último se aprecia en los perfiles longitudinales y transversales de la Figura 2, cuya ubicación se encuentra en la Figura 3. En consonancia con las profundidades del SAG existen marcados gradientes de temperatura, presentando los mayores valores en un eje de dirección noreste-suroeste localizado en territorio brasileño, pero no se observan alteraciones geotermales.

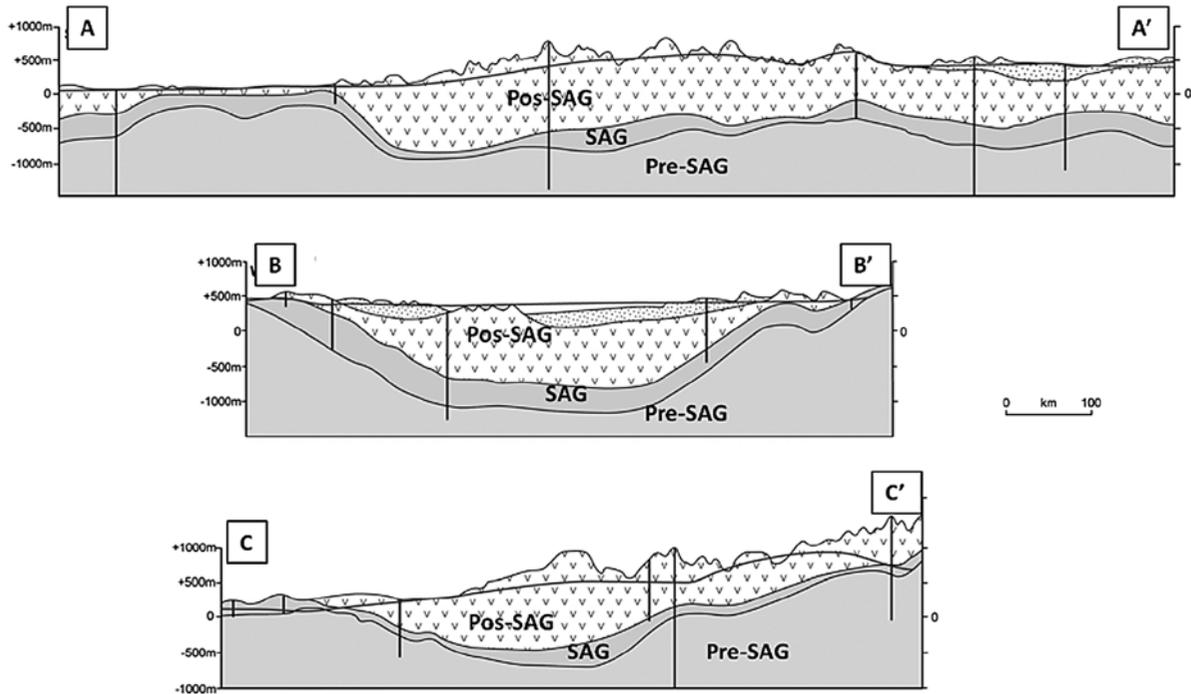


Figura 2. Perfiles geológicos esquemáticos longitudinal (norte-sur) y transversales (oeste-este), modificados de Foster et al. (2009). La ubicación de los perfiles se muestra en la Figura 3.

Figure 2. Longitudinal geologic profile (north-south) and transverse geologic profiles (west-east), [taken from Foster et al. (2009), with modifications]. The locations of the profiles are shown in Figure 3.

La cubierta basáltica del SAG (formación Serra Geral o Arapey según el país) le confiere características de confinamiento y/o surgencia en aproximadamente un 90% de su superficie, siendo el 10% restante de afloramiento. Si bien se desconoce aún en detalle el grado de fracturamiento y/o alteración de los basaltos en toda su extensión, es poco probable que sean completamente impermeables. Numerosos antecedentes a nivel mundial referidos a este tipo de unidades evidencian la posibilidad de una conexión hidráulica con las unidades infrayacentes (Custodio y Llamas, 1976). En el SAG propiamente dicho, estudios recientes de Fernández et al. (2011) en la zona de Ribeirão Preto (São Paulo, Brasil) sugieren que la recarga subvertical del SAG se ve dificultada debido a la no propagación de los sistemas de fracturas de las formaciones basálticas más allá de los 25 m de profundidad, funcionando como una barrera hidráulica de carácter regional.

El SAG recibe recarga directa por precipitación y marcados intercambios con el sistema de agua superficial (fundamentalmente en los sectores de afloramiento). La zona de descarga del sistema regional es aún incierta. Si bien se identifican sistemas locales de recarga/descarga en las zonas de afloramiento en el borde oeste del sistema, las hipótesis acerca de las posibles alternativas de descarga son variadas; por

ejemplo, tramos de los ríos Uruguay y Paraná, formaciones infrayacentes, zonas de fracturamiento de los basaltos, entre otros (Vassolo, 2007; Vives et al., 2008).

El comportamiento en los bordes propuesto para el SAG se presenta en la Figura 3 (LEBAC, 2008), donde puede observarse la alternancia de zonas de flujo nulo, descarga o salida y recarga o ingreso. La recarga en general se asume solo por áreas de afloramiento. Existen dos regiones internas de recarga, la meseta de Mercedes en Argentina y las ventanas en el sector oeste del territorio de Brasil, donde el SAG no está confinado por la Formación Serra Geral y que directamente está conectado a las formaciones terciarias que permitirían la infiltración profunda hacia el SAG. En la Figura 3, estas áreas potenciales de recarga se identifican por la presencia de curvas piezométricas cerradas. El modelo conceptual actual no contempla recarga indirecta al SAG provenientes de los basaltos ni flujos verticales (ascendentes/descendentes de formaciones infrayacentes o pre-SAG).

Los afloramientos del sector oeste se comportan como zonas de recarga local por excedente de la precipitación y como zonas de descarga de flujos, tanto locales como regionales, a través del sistema de ríos que drenan al oeste hacia la cuenca del río

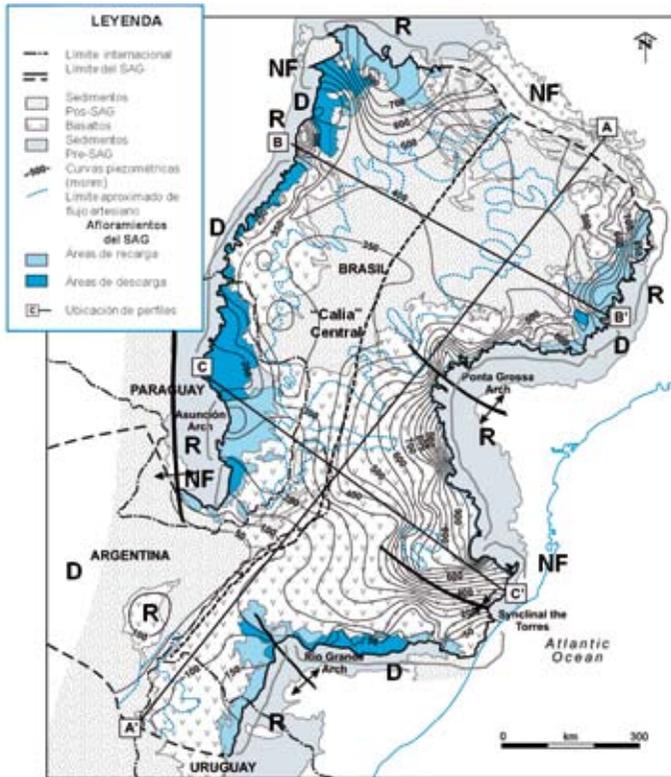


Figura 3. Mapa piezométrico del SAG con las condiciones de contorno. Modificado de Foster et al. (2009).
Figure 3. Piezometric map of the GAS with boundary conditions [taken from Foster et al., (2009), with modifications].

Paraguay. Esta situación, aparentemente en menor proporción, también se observa en el sector sur a lo largo de la frontera en el Estado de Santa Catarina, Brasil.

El mapa de niveles piezométricos (Figura 3) fue construido mayormente con datos de niveles medidos en el momento de la construcción de los pozos. En consecuencia abarcan una ventana temporal de 20-30 años a partir del año 1970. La superficie piezométrica resultante no sería representativa de niveles actuales, en particular en zonas de grandes explotaciones. La dirección predominante de flujo a nivel regional es de norte y este hacia el centro de la cuenca, influenciada por las características tectónicas y estructurales de la cuenca sedimentaria.

Métodos -estructura del modelo

Para la simulación numérica se empleó el código TRANSIN, que resuelve las ecuaciones de flujo de agua subterránea y transporte de solutos utilizando el método de elementos finitos (Medina y Carerra, 1996; Medina et al., 1996). TRANSIN incluye un

potente algoritmo de calibración automática para todos los parámetros de flujo y transporte basado en el método de máxima verosimilitud (Carerra y Neuman, 1986). En esencia, los valores de la conductividad hidráulica en el espacio (y algunas veces en el tiempo), se calculan en base a una estimación previa de los parámetros y a valores medidos de niveles piezométricos (y concentraciones para una simulación de transporte), ver Medina et al. (1996).

La Figura 4 muestra la región modelada, que cubre 1.200.098 km² (de acuerdo al sistema de proyección de coordenadas Cónica de Lambert modificado, denominado Lambert_SAG4 - ver Vives et al., 2008). El dominio fue discretizado en 46862 elementos triangulares y 23890 nodos. La malla bidimensional presenta un mayor refinamiento en las áreas de elevados gradientes hidráulicos (generalmente en la zonas de afloramiento) con un promedio de 25 km² por elemento. En la zona central del dominio de estudio, coincidentemente con la traza del río Paraná, los elementos tienen los mayores tamaños. El SAG se simuló como una capa continua de areniscas, sin interacción vertical con las unidades geológicas infra o suprayacentes. Esta simplificación implica la simulación de un flujo esencialmente bidimensional.

El valor de la conductividad hidráulica es muy disperso no existiendo un mapa para todo el SAG. Los ensayos de bombeo disponibles y la bibliografía referente al tipo de sedimentos que lo componen brindan un límite máximo aproximado de 1-2 m/d (Freeze y Cherry, 1979) en tanto que en territorio paraguayo se reportaron valores entre 1,6 y 3,8 m/d (Vassolo, 2007). En Uruguay se encuentran conductividades hidráulicas del mismo orden, con un rango entre 0,12 y 5,76 m/d, y un promedio de 1,5 m/d (Gómez et al., 2010). Los valores de conductividad hidráulica utilizados en el modelo fueron corregidos por la temperatura para cada elemento de la malla mediante la formulación de Schneebeli, extraída de Custodio y Llamas (1979):

$$k(\theta) \approx k(20\text{ }^{\circ}\text{C}) \frac{\theta + 20}{40}$$

Siendo θ la temperatura en $^{\circ}\text{C}$. De acuerdo a los valores de θ calculada a partir del mapa de isotermas provisto por LEBAC (2008), los valores de la $k(\theta)$ serán entre tres y cuatro veces mayores que los valores puntuales estimados de conductividad hidráulica a la temperatura de superficie.

La zonificación de la conductividad se desarrolló en base a diferentes criterios: espesores, presen-

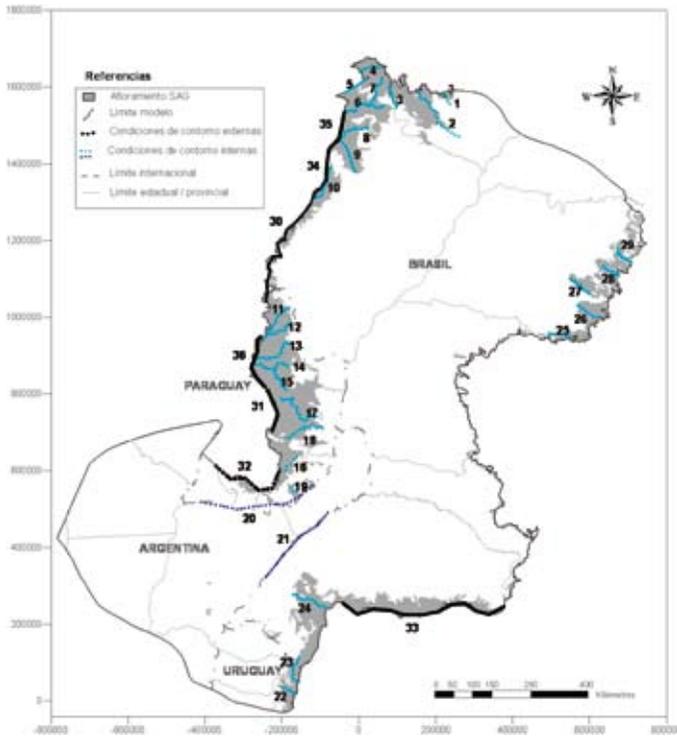


Figura 4. Zona modelada, áreas de recarga coincidentes con las zonas de afloramientos y ríos simulados explícitamente (con su numeración interna).

Figure 4. Modeled area, recharge zones coincide with outcropping areas and simulated streams (containing internal numbering).

cia de estructuras y piezometría, o combinación de ellas. En este trabajo se presentan los resultados que corresponden a la zonificación definida en base al análisis de cambios de gradientes hidráulicos evidenciados por la piezometría, con un total de 31 zonas de conductividad (Vives et al., 2008).

La recarga directa se simuló sobre la zona aflorante (Figura 4), sin sustraer áreas urbanas impermeabilizadas que puedan existir en dichas zonas. La tasa de recarga se definió como un porcentaje fijo de la precipitación media anual, asumiendo un gradiente de precipitación anual en dirección nortesur desde 2000 mm en el norte a 1600 mm en el sur. El porcentaje fue variando en un rango entre 1 y 10% de la precipitación anual, finalmente se trabajó con 5%. Las descargas locales y regionales se simularon a través de los bordes del modelo y de los cursos de agua en contacto con el acuífero (Figuras 3 y 4).

Además se analizó la hipótesis de que tramos de los ríos Paraná (número 20 en la Figura 4) y Uruguay (número 21 en la Figura 4) constituyen zonas de descarga del acuífero. El bombeo simulado alcanzó 1040 hm³/año, distribuido en 20 zonas, tal como se muestra en la Figura 5.

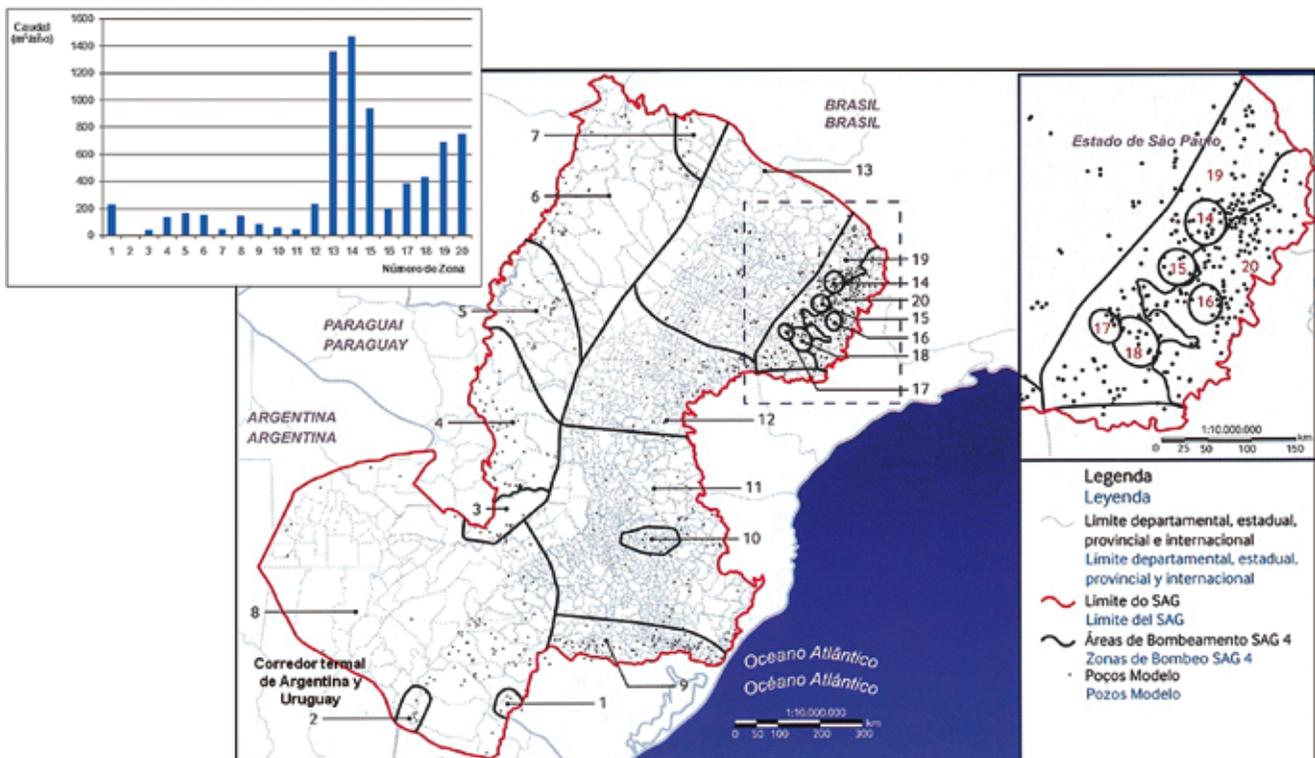


Figura 5. Ubicación de pozos de explotación y zonificación utilizada en el modelo (modificado de PSAG, 2009).

Figure 5. Sites of pumping wells and zoning used in the model [taken from the PSAG (2009), with modifications].

Resultados - discusión

Caso 1: Influencia del régimen de flujo en la calibración

En teoría, una simulación estacionaria debería representar el estado del sistema antes de que se inicien las explotaciones, o por lo menos cuando el grado de explotación es reducido de manera que la afectación del sistema natural es despreciable. Posteriormente, se realiza una simulación transitoria, es decir variable en el tiempo, incorporando progresivamente las explotaciones a medida que se incrementa el bombeo, para lo cual se necesita no solo una evolución temporal del bombeo sino también de los niveles piezométricos. Lamentablemente, en el PSAG no se dispuso de esta información. Los datos de niveles utilizados (114 valores observados elegidos en virtud de su confiabilidad) corresponden al momento de la construcción de los pozos (cuya fecha se desconoce en la mayoría de los casos), en consecuencia abarcan una ventana temporal de 20-30 años a partir del año 1970, y la estimación de las explotaciones es una aproximación a la situación actual. Por ello, primero se realizó una simulación en estado estacionario incluyendo explotaciones, **caso 1A**.

La estrategia de calibración consistió en calibrar automáticamente la conductividad hidráulica (K) empleando 114 observaciones de niveles piezométricos con el objetivo de obtener un buen ajuste entre niveles piezométricos medidos y simulados, que los valores de K sean coherentes con el conocimiento actual del acuífero y que la piezometría calculada sea comparable con la propuesta por el LEBAC (2008). Además de las conductividades, se calibró el coeficiente de almacenamiento en el modelo transitorio.

La Figura 6 muestra las 31 zonas de K con los valores calculados. El rango de conductividades calculadas para el CASO 1A fue de 0,9 a 35 m/d, con valores más elevados en las zonas 3, 4 y 27. Las conductividades de las zonas 9 y 16 no se calibraron, fijándose su valor en 75 y 100 m/d, respectivamente. Excepto en pocas zonas (por ejemplo, 1, 5, 17 y 21) los valores calculados de la conductividad hidráulica resultaron mayores a los esperados para areniscas; esto podría explicarse en parte por los efectos de escala que se manifiestan en modelos regionales (Martínez-Landa y Carrera, 2005). La conductividad hidráulica en la región central del área modelada resultó mayor, coincidiendo con el modelo conceptual que propone la convergencia de la mayoría de los flujos de todo el sistema. Este resultado indicaría la necesidad de modificar el modelo conceptual para que permita la



Zona	K (m/d)		Zona	K (m/d)	
	1A	1B		1A	1B
1	1.28	0.71	16	100.00	27.15
2	7.95	44.20	17	1.45	1.35
3	144.31	101.30	18	2.54	2.47
4	44.00	34.40	19	2.82	2.30
5	1.16	1.01	20	5.06	4.61
6	0.88	0.91	21	1.20	2.69
7	12.50	20.92	22	7.89	7.54
8	5.40	13.61	23	18.95	16.85
9	75.00	11.07	24	23.67	25.23
10	10.46	18.95	25	12.29	10.05
11	5.98	3.32	26	9.06	16.18
12	9.30	25.04	27	66.80	70.12
13	16.10	0.33	28	3.06	81.24
14	2.69	69.15	29	9.43	10.23
15	4.23	5.08	30	34.62	12.91
			31	6.63	1.97

Figura 6. Zonificación de conductividad hidráulica y valores de K calibrados: CASO 1A (estacionario) y CASO 1B (transitorio).
Figure 6. Hydraulic conductivity zone and calibrated K values: CASE 1A (steady-state) and CASE 1B (transient).

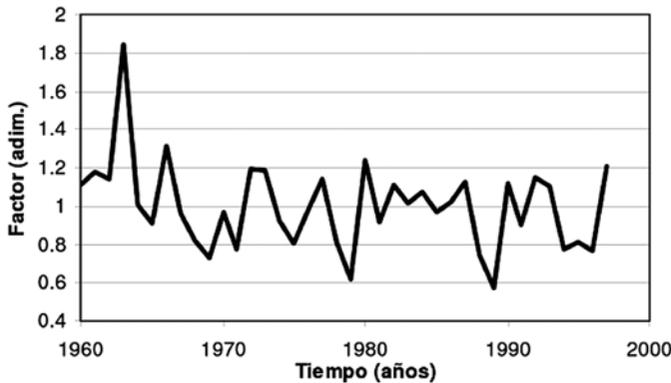


Figura 7. Función de tiempo aplicada a la tasa de recarga.
Figure 7. Time function applied to recharge rate.

conducción de mayores flujos, por ejemplo, mediante la definición de una zona de flujo preferencial o de una conexión con las unidades geológicas suprayacentes.

En el modelo transitorio **caso 1B**, se trabajó para un período de 38 años (1960-1997) utilizando la zonificación del **caso 1A**, con un paso de tiempo anual e iniciando el período de simulación con un estado estacionario sin bombeo. Para los periodos siguientes se construyó una función temporal para la tasa de recarga que representa las anomalías respecto al valor medio anual de la precipitación. Como valor indicativo de la variación de la precipitación anual se utilizó la serie de la estación Rivera-Uruguay; las anomalías respecto de la media resultante (llamado factor, ver Figura 7) se aplicaron a cada zona de recarga, las que poseen diferentes tasas dependiendo de su localización geográfica. Además se supuso que desde el ini-

cio de la simulación transitoria el bombeo se mantiene constante hasta el final del tiempo de estudio. El modelo se calibró comparando los niveles medidos con los calculados al final del período de simulación.

Respecto a los valores de K (Figura 6), los valores más altos para el Caso 1A (zonas 3 y 16) disminuyeron en el caso 1B. La conductividad hidráulica aumentó en 14 zonas, y disminuyó en 13, manteniéndose aproximadamente igual en el resto de las zonas. En el Caso 1A, solo 5 zonas arrojaron valores de K comprendidos entre 15 y 50 m/d mientras que para el Caso 1B, nueve zonas se encontraron dentro de ese rango. No obstante estos resultados, los mayores valores de K en ambas simulaciones corresponden a la zona central donde los gradientes hidráulicos observados son menores, lo que resulta razonable y coherente a lo esperado de acuerdo al modelo conceptual. El valor calculado del coeficiente de almacenamiento fue de 2.9×10^{-4} .

Tanto en la simulación en régimen estacionario como en régimen transitorio, los niveles piezométricos simulados estuvieron dentro de la meta de calibración, definida en base a la cantidad y calidad de los datos observados disponibles. En el CASO 1A, el error medio en valor absoluto fue de 44,41 m, solo 3 puntos presentan errores mayores a +/- 100 m, mientras que 51 puntos presentan errores mayores a +/- 30 m. Con la simulación en régimen transitorio el error medio se redujo a 41,26 m. En la Figura 8 se comparan los niveles medidos y simulados para el Caso 1A y 1B. Cualitativamente las curvas piezométricas simuladas (Figura 9) muestran una configuración que reproduce los patrones de flujo definidos en el modelo conceptual.

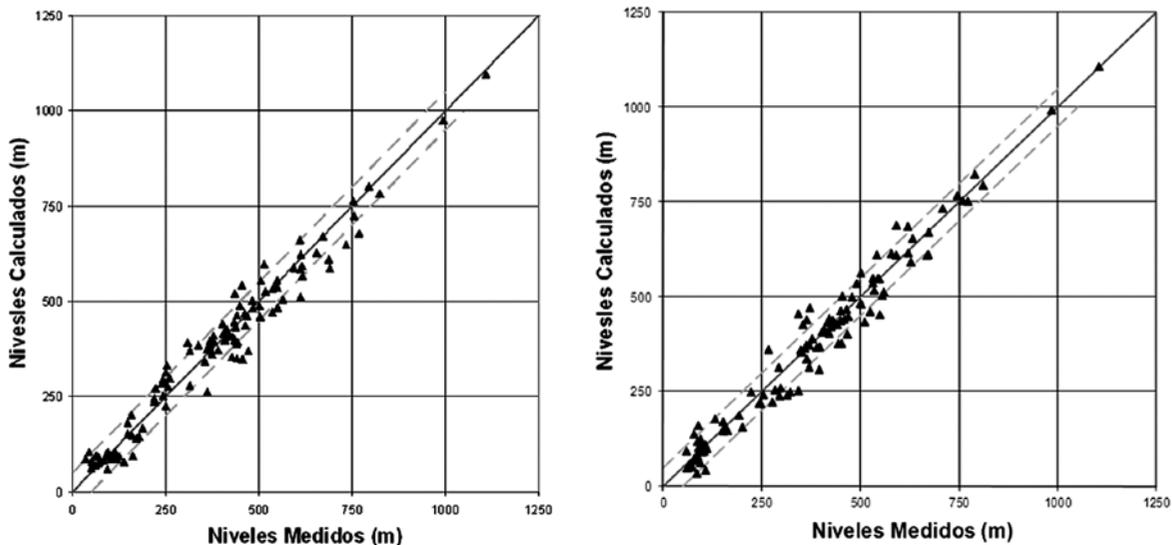


Figura 8. Comparación entre niveles medidos y simulados (izquierda: Caso 1A, derecha: Caso 1B).
Figure 8. Comparison between measured and calculated levels (left: Case 1A, right: Case 1B).

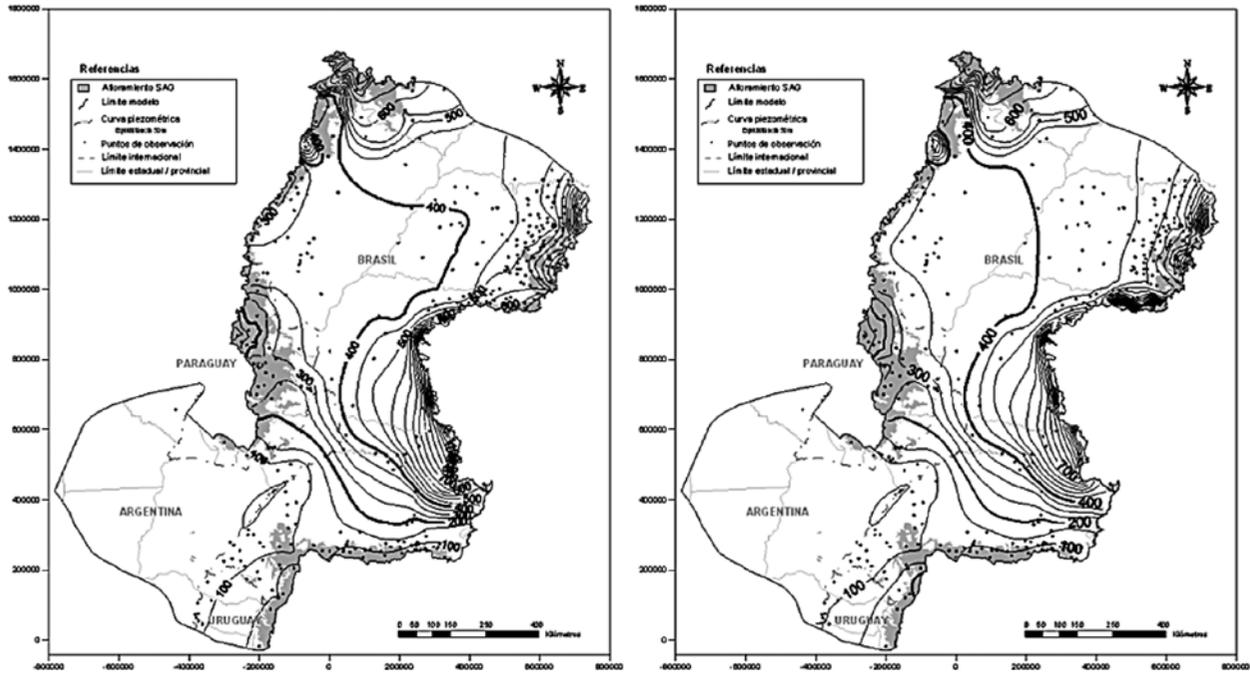


Figura 9. Piezometría (en metros) simulada CASO1A (estacionario) y CASO 1B (transitorio).
Figure 9. Simulated potentiometric map (in metres). CASE 1A (steady-state) and CASE 1B (transient).

El balance de masa del modelo indicó que los flujos a través del sistema son pequeños comparados con el volumen de agua en el almacenamiento subterráneo y la descarga anual de los ríos Paraná y Uruguay. En la Tabla 1 se comparan los flujos para el caso 1A con los flujos del último paso de tiempo del caso 1B. Para el caso transitorio, la recarga y la interacción río/acuífero son las principales entradas y salidas del sistema, respectivamente.

En ambos casos la tasa de explotación no supera la tasa de recarga simulada del acuífero a nivel regional,

pudiendo existir zonas locales donde la explotación sea mayor poniendo en riesgo la sustentabilidad del recurso.

El flujo de salida a través de los 29 tramos de ríos simulados alcanzó un valor de 121.64 m³/s para el Caso 1B, que se encuentra dentro del orden de magnitud de la recarga. Particularmente se analizó el flujo a través de los tramos simulados de los ríos Paraná y Uruguay, por ser hipotéticas zonas regionales de descarga del SAG, y los datos se pueden ver en la Tabla 2.

	Caso 1A		Caso 1B	
	m ³ /s	%	m ³ /s	%
Recarga	113.03	84.2	136.65	84.2
Flujo prescripto por el este	21.18	15.8	25.60	15.8
TOTAL ENTRADAS	134.21	100.0	162.25	100.0
Bombeo	-32.94	24.5	-32.94	23.8
Nivel prescripto	-5.99	4.5	-7.16	6.1
Interacción río/acuífero	-95.27	71.0	-121.64	70.1
TOTAL SALIDAS	-134.21	100.0	-161.74	100.0
Almacenamiento			0.51	

Tabla 1. Balance de masa para los casos 1A (estacionario) y 1B (transitorio). Flujos positivos indican entradas al sistema, y flujos negativos salidas.

Table 1. Mass balances for Case 1A (steady-state) and 1B (stationary). Positive flow indicates recharge into the aquifer and negative flow discharge.

	Caso 1A	Caso 1B
Río Paraná	-0.92	-1.26
Río Uruguay	-9.71	-9.98

Tabla 2. Flujos de salida a través de los ríos Paraná y el Uruguay. Flujos en m³/s.

Table 2. Discharge flows (in m³/s) through the Paraná and Uruguay rivers.

La descarga por el Río Paraná aumentó levemente en el caso 1B mientras que por el Río Uruguay se mantuvo prácticamente constante, estos cambios pueden atribuirse a los distintos valores de K calibrados en las zonas por las cuales atraviesan ambos ríos.

Caso 2: Importancia del régimen temporal de flujo sobre el balance de masa y análisis de la respuesta ante diferentes solicitaciones externas

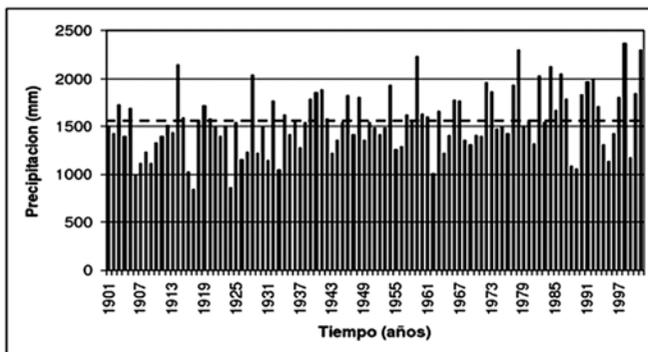
En este caso se estudiaron los efectos de un posible aumento de las extracciones en el corredor termal argentino/uruguayo y en la región oeste del Estado de São Pablo, para la zonificación de conductividad hidráulica resultante del CASO 1A.

El aumento de las extracciones se aplicó en la zona de bombeo 2 para el corredor termal uruguayo-argentino y en las zonas 14, 15, 16, 17 y 18 para la región oeste del Estado de São Pablo (ver Figura 5).

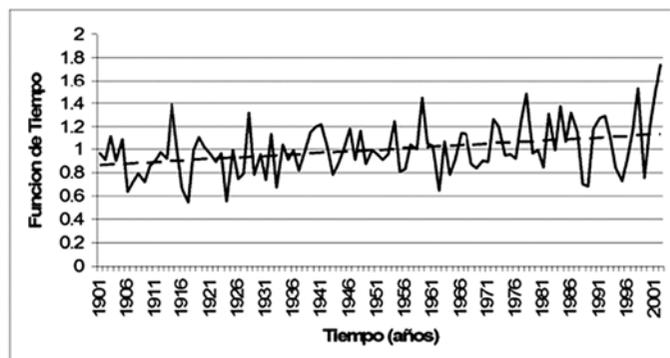
Se realizaron tres simulaciones en régimen transitorio para un período de 100 años (36.000 días), con paso de tiempo anual. En la primera se mantuvo el caudal de bombeo actual durante todo el período simulado (Q_{actual}). En la segunda (2Q) y la tercera (3Q) se mantuvieron todas las características del modelo para Q_{actual}, pero duplicando y triplicando de forma constante el bombeo actual, respectivamente.

Además se utilizó una función temporal de variación de la recarga en los 100 años definida a partir de la serie histórica de precipitaciones mensuales para la serie 1901-2001, obtenida de la base de datos de CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, Inglaterra). Dichos datos son sintéticos y fueron estimados a partir de una red global de estaciones meteorológicas, para puntos de grilla espaciados 5° entre sí. En este caso se utilizaron los datos del punto 30° 15' latitud sur, y 55° 15' longitud oeste, cercana a las localidades de Rivera y Santana do Livramento (Figura 10a). Nótese que la media de 1550 mm es superada con mayor frecuencia y montos mayores en la segunda mitad de la serie, lo que se traducirá en un aumento de la recarga. Este efecto puede verse claramente en la Figura 10b, donde se graficó la función de tiempo aplicada a las tasas de recarga. La línea de tendencia muestra que en los primeros 50 años en promedio la precipitación anual fue menor que el promedio histórico (función de tiempo < 1), en la segunda mitad fue mayor (función de tiempo > 1).

Con el fin de analizar el efecto del incremento de las explotaciones sobre el sistema se analizó la diferencia de nivel o descenso que se registraría en puntos específicos del acuífero durante el tiempo de simulación. Para ello se seleccionaron trece puntos dentro del SAG que se denominaron puntos de control de niveles piezométricos o pozos virtuales cuya ubicación se muestra en la Figura 11. Para conocer el radio de influencia de las explotaciones se ubicaron algunos de los pozos virtuales dentro de las zonas de explotación, otros en las cercanías y otros alejados de ellas. El uso del término "pozos virtuales" obedece a una convención, sin que lleven consigo una definición de sus características constructivas. Se trata simplemente de puntos del dominio de modelación donde se



(a)



(b)

Figura 10. a) Precipitación anual serie 1901-2001 en punto de grilla cercano a Rivera-Santana. b) Función de tiempo para la serie anual 1901-2001.

Figure 10. a) 1901-2001 annual precipitation series at a grid-point near to Rivera-Santana. b) Time function for the annual series 1901-2001.

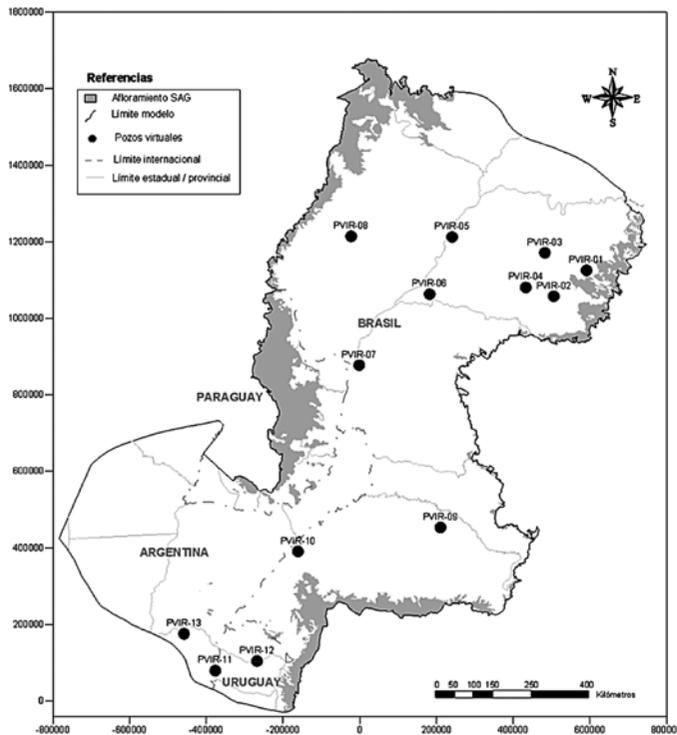


Figura 11. Ubicación de los puntos virtuales o de control.
Figure 11. Sites of virtual or control points.

analiza la evolución de niveles para todos los pasos de tiempo de la simulación transitoria.

En la Figura 12 se presentan los hidrogramas calculados en los pozos virtuales que registraron un cambio producto del incremento en la explotación. Los PVIR-01 y PVIR-02 están emplazados en la zona que concentra más del 50% del volumen estimado de explotación actual, y responden en forma inmediata al incremento del bombeo, observándose que tienden a un nivel de equilibrio hacia el final del período modelado. La magnitud final del descenso es significativa, para el caso de 200% de incremento del caudal es el doble que para un incremento del 100% del caudal de explotación.

En PVIR-03, ubicado aproximadamente a 130 km al oeste de PVIR-01, y PVIR-04, a 100 km al oeste de PVIR-02, se observa un incremento de niveles relativamente pequeño (2-3 m) para el Q_{actual} , que puede atribuirse al incremento de la recarga en las simulaciones transitorias (ver Figura 10.b), ese aumento no compensaría las extracciones cuando estas se duplican o triplican. El efecto del incremento del bombeo cercano recién comienza a notarse luego de 45-50 años del inicio de la simulación en el pozo más alejado y en 20 años en el más cercano.

El PVIR-11, ubicado en una zona donde el acuífero se explota con fines termales, responde rápidamente al incremento de los bombeos. PVIR-13, ubicado en

zona de gran confinamiento, muestra una tendencia al descenso pero de mucha menor magnitud respecto a los demás sitios. PVIR-12, ubicado en una zona de afloramiento con concentración de perforaciones, muestra incrementos de descensos inmediatos para los tres caudales ensayados.

En general, los efectos del incremento de la explotación son notorios e inmediatos en sitios cercanos al bombeo, mientras que se registran retrasos a medida que uno se aleja de la zona de extracción. Más allá de los 300 km, el efecto del bombeo sería imperceptible, al menos en las condiciones impuestas en el escenario de explotación realizado (100 años).

Conclusiones

La implementación del modelo en régimen transitorio permitió analizar la respuesta dinámica del sistema subterráneo ante variaciones en las solicitaciones externas tanto por incremento de los volúmenes de explotación como por fluctuaciones de la recarga por efecto del régimen de precipitaciones. Las principales conclusiones son:

- La calibración en régimen de flujo transitorio mejora la calibración con respecto al régimen estacionario reduciendo significativamente los errores de calibración.
- Los valores de conductividades hidráulicas calibradas tienden a ser mayores que los esperados. Esto podría atribuirse al efecto de una mayor recarga dada por la tendencia creciente de la función temporal en el caso de régimen transitorio que coincide con el período de las observaciones en el régimen transitorio.
- En ambos regímenes de flujo, la dirección predominante de flujo a nivel regional es de norte y este hacia el centro de la cuenca, influenciada por las características tectónicas/estructurales de la cuenca sedimentaria. Los patrones de flujo simulados reproducen los patrones de flujo delineados en los dominios identificados en el modelo conceptual.
- En ambos regímenes de flujo, los gradientes hidráulicos simulados resultan en general similares a los planteados en el modelo conceptual, teniendo presente que el mapa potenciométrico integra niveles medidos en un intervalo de 20-30 años.
- El balance de masa del modelo confirmó que los flujos a través del sistema son pequeños comparados con el volumen de agua en el almacenamiento subterráneo y la descarga anual de los ríos Paraná y Uruguay.
- Los efectos del incremento de la explotación son notorios e inmediatos en sitios cercanos al bombeo,

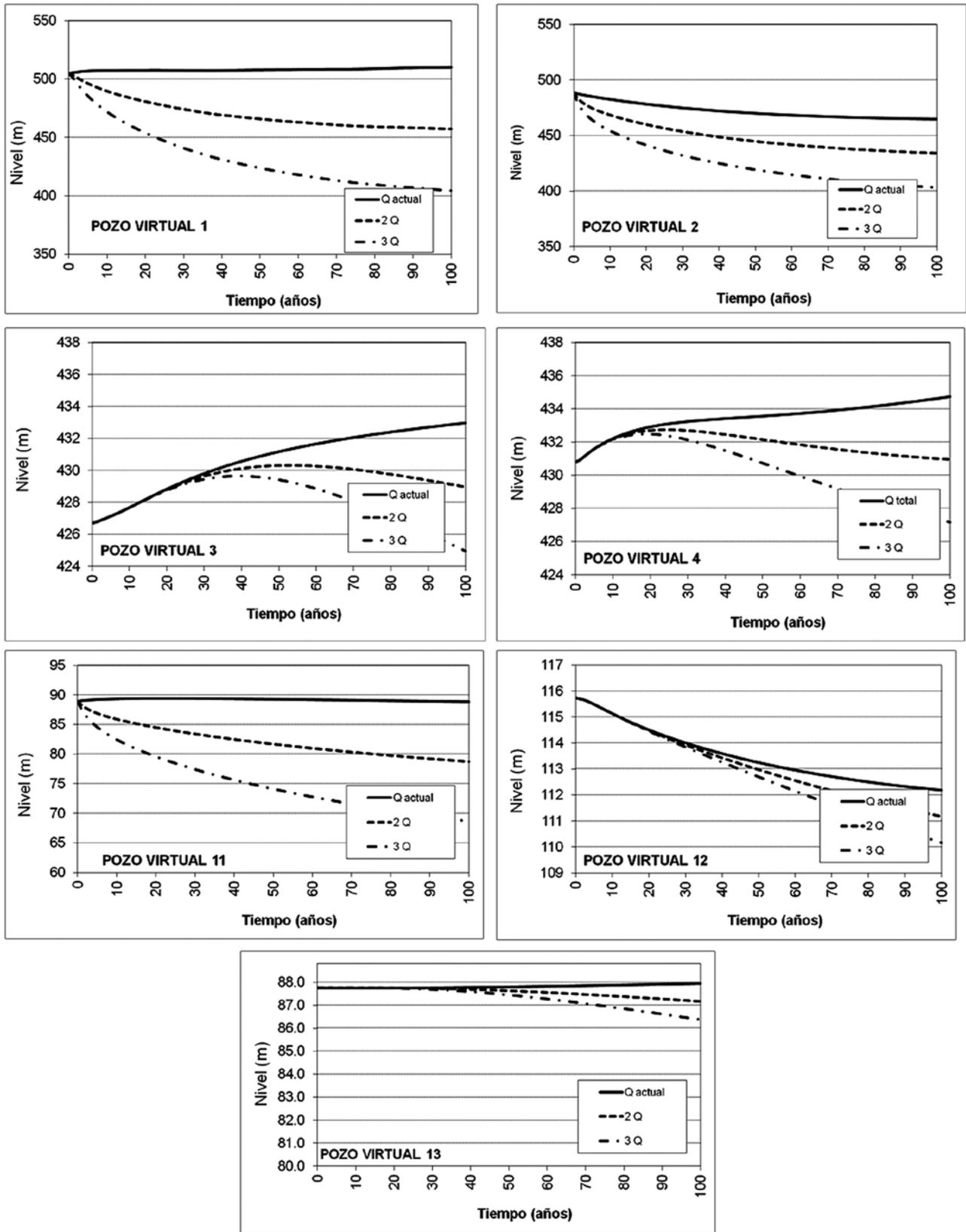


Figura 12. Hidrogramas calculados para los pozos virtuales o de control. Observar que las escalas verticales de los hidrogramas son diferentes.

Figure 12. Hydrographs for virtual or control wells. Note that the vertical scales are different.

mientras que se registran en forma escalonada en el tiempo a medida que uno se aleja de la explotación. Más allá de los 300 km, el efecto del bombeo sería imperceptible, al menos en las condiciones impuestas en el escenario de explotación realizado (100 años).

- Se ha mostrado la potencialidad y necesidad de calibrar el modelo numérico para un transitorio, fundamentalmente por el bajo flujo subterráneo que podría determinar regiones donde puede ser afectado el almacenamiento, modelo fundamental para el gerenciamiento sustentable de los recursos subterráneos en acuíferos con poca tasa de renovación.

Agradecimientos

Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT, Argentina, Proyecto PICT'08 N° 2071), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina), Integrantes de la Organización de Estados Americanos, Secretaría General del PSAG y Coordinadores Nacionales, Integrantes del Consorcio Guaraní.

Referencias

Araújo, L.M., Franca, A.B., Potter, P.E. 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.

Campos, H.C.N.S. 2000. Mapa hidrogeológico do aquífero Guaraní. *Acta Geológica Leopoldensia*, 23 (4), 1-50.

Carrera, J., 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.

Custodio, E., Llamas, J.R. 1976. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, Barcelona. pp. 2450.

Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Fernandes, A. J., Maldaner, C., Rouleau, A. 2011. Análise de fraturas nos basaltos de Formação Serra Geral (Ribeirão Preto, SP): aplicação para a elaboração de modelo hidrogeológico conceitual, *Geologia USP. Série Científica*, v. 11, pp. 3-20.

Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G., Garduño, H. 2009. *The Guaraní Aquifer Initiative –Towards Realistic Groundwater Management in a Transboundary Context*. GW-Mate Sustainable Groundwater Management, Lessons for Practice, Case Profile Collection Num. 9.

Gómez, A.A., Rodríguez L.B., Vives, L.S. 2010. The Guaraní Aquifer System: estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border. *Hydrogeology Journal*, 18, 1667-1684.

LEBAC, 2008. *Mapa hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní. Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*. Global Environment Facility (GEF). Reporte Técnico 57 pp.

Machado, J.L., Faccini, U.F. 2004; Influência dos falhamentos regionais na estruturação do Sistema Aquífero Guaraní no Estado do Rio Grande do Sul. *Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas*, 13, Cuiabá, Brasil. ABAS 2004, CD.

Martínez-Landa, L., Carrera, J. (2005) An analysis of hydraulic conductivity scale effects in granite (Full-scale Engineered Barrier Experiment (FEBEX), Grimsel, Switzerland). *Water Resources Research* (41), W03006, doi: 10.1029/2004WR003458.

Medina, A., Carrera, J. 1996. Coupled estimation of flow and solute transport parameters. *Water Resources Research*, 32 (10), 3063-3076.

Medina A., Galarza G., Carrera, J. 1996. *TRANSIN, versión 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° FI2W/CT91/0080. Topical Report 16. ENRESA, 1996.

PSAG – *Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*. 2009. Acuífero Guaraní, Programa Estratégico de Acción.

Rebouças, A.C., 1976. *Recursos hídricos subterráneos da Bacia do Paraná. Análise de préviabilidade*. Post Ph.D. Thesis, USP-São Paulo University, São Paulo.

Rosa Filho, E.F., Forlin, M., Xavier, J.M. 1998. Informações básicas sobre a distribuição do Sistema Aquífero Guaraní nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. *A água Rev.* 10, 23-26.

Soares, A.P., 2008. *Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guaraní: controles estratigráficos e estruturais*. Tesis Doctoral del Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Brasil.

Vassolo, S., 2007. *Uso sostenible del sistema acuífero Guaraní en el sector oriental del Paraguay*. Final Report Project Sistema Acuífero Guaraní in cooperation with Environment Secretary (SEAM). Asunción, Paraguay

Vives L., Campos H., Candela L., Guarracino, L. 2001. Modelación del acuífero Guaraní (Guaraní Aquifer Modeling). *Boletín Geológico y Minero* 112, Número Especial, 51-64.

Vives L., Rodríguez L., Gómez A., Cota S.D.S. 2008. *Modelación Numérica Regional del Sistema Acuífero Guaraní*. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Global Environment Facility (GEF). Informe Técnico. 144 p.

Recibido: diciembre 2011

Revisado: abril 2012

Aceptado: marzo 2012

Publicado: julio 2012