



## Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní



### PROGRAMA DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

### INFORME DE ACTIVIDADES

### EVALUACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EN ÁREAS PILOTO DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ



## INFORME DE ACTIVIDADES

ÁREA TEMÁTICA: Modelos numéricos

LUGAR: Montevideo

PERÍODO: 11 al 15 de agosto de 2008

Preparado por:

Dr. Marcelo Varni

15/08/2008



## Equipo del Proyecto

### Responsables Nacionales:

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| Por Argentina | Fabián López           |
| Por Brasil    | Eustaquio Luciano Zica |
| Por Paraguay  | Carlos López Dose      |
| Por Uruguay   | Víctor Rossi           |

### Coordinadores Nacionales:

|           |   |
|-----------|---|
| Argentina | Miguel Ángel Giraut<br>María Josefa Fioritti (Co-coordinadora)<br>María Santi (Co-coordinadora) |
| Brasil    | João Bosco Senra  |
| Paraguay  | Elena Benítez   |
| Uruguay   | Lourdes Batista   |

### Representantes OEA:

Jorge Rucks  
Carlos Sténeri

### Representantes Banco Mundial:

Abel Mejía  
Douglas Olson  
Samuel Taffesse

### Secretaría General:

|                             |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| Secretario General          | Luiz Amore            |
| Coordinador Técnico         | Jorge Santa Cruz      |
| Coordinador Técnico         | Daniel García Segredo |
| Coordinador de Comunicación | Roberto Montes        |
| Asistente técnico           | Alberto Manganelli    |
| Auxiliar técnico            | Santiago Ferrero      |
| Administración              | Luis Reolón           |
| Informática                 | Diego Lupinacci       |
| Secretaria Bilingüe         | Mariángel Valdés      |

### Facilitadores proyectos piloto:

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| Concordia – Salto | Enrique Massa Segui |
| Rivera – Santana  | Achylles Bassedas   |
| Itapúa            | Alicia Eisenkölbl   |
| Ribeirão Preto    | Mauricio dos Santos |



La ejecución del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní es posible gracias al acuerdo de cooperación alcanzado entre los gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, el aporte financiero del Global Environment Facility (GEF) y otros donantes, la cooperación técnica y financiera del Banco Mundial que es la agencia implementadora de los Fondos GEF y la Secretaría General de la Organización de Estados Americanos (SG/OEA) en su condición de agencia ejecutora regional.

Dentro de la Componente 1 destinada a la expansión y consolidación de la base de conocimiento científico y técnico existente acerca del Sistema Acuífero Guaraní se lleva adelante el Programa de Seguimiento y Control de Calidad de las actividades desarrolladas por las diferentes empresas adjudicatarias de las licitaciones correspondientes.

Las Empresas Participantes son:

Licitación SBCC/01/04 – 1/1018.1 Servicios de Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní.

### **“Consorcio Guaraní”**

**(TAHAL; Hidrocontrol S.A.; Hidroestructuras S.A.; SEINCO; Arcadis hidroambiente S.A.)**

**Bme. Mitre 1480/602 – Tel/Fax.: (598-2) 9153363 - C.P. 11300 – Montevideo – Uruguay**

**Coordinador Proyecto: Dr. Gerardo Veroslavsky**

**gveroslavsky@seinco.com.uy**

Licitación LPI/03/05 Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizada del Sistema Acuífero Guaraní

### **SNC-Lavalin Internacional Inc.**

**(DH; PROINSA; P y T Consultora; LCV; GEODATOS)**

**2200 Lake Shore Blvd. W. Tel.: (416) 252-5311 Fax: (416) 231-5356**

**Toronto (Ontario) M8V 1A4 Canadá**

**Coordinador Proyecto: M. Sc. Adriana Lafleur**

**adriana.lafleur@snclavalin.com**

Los resultados, interpretaciones, conclusiones, denominaciones y opiniones vertidas en este informe y la forma en que aparecen son responsabilidad exclusiva del autor y no implican juicio alguno sobre las condiciones jurídicas de los países, territorios, ciudades o zonas, o de actividades diversas, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites, por parte de los países beneficiarios, ni de la Secretaría General de la OEA (SG/OEA), ni de la Secretaría General del Proyecto (SG-SAG).



## **EVALUACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS EN ÁREAS PILOTO DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ**

### **1. Modelo Numérico Hidrogeológico del área piloto Itapúa**

Se evalúa el Informe del Modelo Numérico Hidrogeológico del Área Piloto Itapúa, preparado por Cristopher Neville y por Henri Sangam para SNC-Lavalin. También se analizó el modelo numérico por medio del código Visual Modflow. El modelo numérico utilizado es el MODFLOW 2000.

La estratigrafía del área de estudio consiste en la secuencia:

- Cuaternario reciente
- Basalto (Fm. Alto Paraná), y
- Arenisca (Fm. Misiones).

Estas últimas se apoyan en areniscas pérmicas que, según la bibliografía tienen una conductividad hidráulica 6000 veces menor que las areniscas de la Fm. Misiones por lo que se las considera prácticamente impermeables y constituyen la base del sistema hidrogeológico modelado. En el modelo matemático se consideran las siguientes capas: cuaternario reciente, una capa de basalto superior y otra de basalto inferior y, finalmente, una capa con las areniscas de la Fm. Misiones.

Se modela un área más grande que el área piloto, con el fin de encontrar situaciones físicas que puedan conceptualizarse como condiciones numéricas de borde para el modelo.

En cuanto a las condiciones de borde, se define un sector de carga constante al norte en la capa de las areniscas (en las capas superiores el borde es impermeable). En todo el sector SE se toma como límite del modelo al río Paraná y, en correspondencia con él se define un borde de carga constante en las tres capas



superiores (cuaternario y basaltos), mientras que en las areniscas se deja el borde impermeable. El resto de los límites externos del modelo está constituido por bordes de flujo nulo, ya que son zonas de divisoria de aguas subterráneas inferidas a partir de la elevación del terreno (con base en una alta correlación entre elevaciones del terreno y de las aguas subterráneas). En el interior de la zona a modelar existen tres cursos de agua, cuya interacción con las aguas subterráneas se simula mediante la condición de borde “dren”. Esto implica que los cursos reciben agua del medio subterráneo y no la ceden en todo su recorrido lo cual, en condiciones de clima húmedo, puede ser real.

Se hacen un par de observaciones:

1. en un tramo de celdas definidas con la condición de “dren” para simular la entrega de agua a los ríos, se ha fijado una conductancia de  $4 \text{ m}^2/\text{d}$ , cuando en el resto del río se han definido valores de 400 y  $800 \text{ m}^2/\text{d}$ .
2. en algunas celdas en las que se define la carga constante en el río Paraná hay valores de carga que no respetan el descenso que deberían tener los niveles del río en el sentido de escurrimiento.

Se definen dos zonas de recarga, una donde las areniscas afloran y otra donde están cubiertas por basalto.

Por otra parte, existe una cantidad relativamente escasa de pozos en los que se tiene información de niveles los cuales, además, no están distribuidos uniformemente por lo que hay zonas con buena densidad de pozos y otras con poca o nula información.

El modelo se corrió en condiciones estacionarias con los pozos bombeando y sin bombear, sin que se produzcan grandes diferencias entre ambas situaciones, lo que refleja el bajo nivel de explotación del acuífero.



Para la calibración del modelo se utilizó una técnica mixta, en parte utilizando el método de prueba y error (ajuste manual) y en parte utilizando calibración automática mediante el código PEST.

Los valores iniciales de los parámetros del modelo fueron conductividades hidráulicas horizontales y verticales de 0,2 y 0,05 m/d para el basalto y de 5 y 0,5 m/d para las areniscas. También definieron 183 y 36,5 mm anuales de recarga para los afloramientos de areniscas y las áreas con basalto, respectivamente.

Los resultados de la calibración muestran parámetros estadísticos de evaluación aceptables. Entre ellos se obtuvo una desviación estándar normalizada del 7,2% (menor al 10%) y un coeficiente de correlación entre niveles observados y simulados de 0,87 (mayor a 0,7).

Los valores de conductividades hidráulicas calibrados fueron de 2,4, 0,26, 0,006 y 1,84 m/d para el cuaternario reciente, los basaltos superior e inferior y, finalmente, la arenisca. Los valores de conductividad hidráulica vertical se tomaron diez veces menores que las horizontales, lo cual es una práctica generalizada. Las recargas finales fueron de 183 y 55 mm anuales para las areniscas aflorantes y para las zonas con basalto, respectivamente. Es decir, la recarga en las areniscas permaneció igual que el valor inicial mientras que aumentó la recarga en áreas de basalto. Un análisis de estos valores muestra que son consistentes con los estimados en la literatura.

La extracción de los pozos constituye sólo un 7% del agua que egresa del sistema (los otros términos salientes son la descarga en el Paraná y en los ríos interiores). El aporte a los tres ríos interiores arroja un caudal básico medio de 4,8 m<sup>3</sup>/s. La configuración de las equipotenciales resultantes es razonable, mostrando un nivel freático con gran influencia de los cursos de agua. Por otra parte, las equipotenciales en la arenisca muestran una configuración mucho más suavizada, lo cual es razonable.



Se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros, es decir, cómo influyen en los niveles los valores de estos parámetros (concretamente, las conductividades hidráulicas de las distintas unidades). Se obtiene que los niveles son más sensibles a la conductividad de las areniscas, luego del basalto inferior, del cuaternario reciente y, finalmente, del basalto superior.

La validación del modelo se realiza simulando varios ensayos de bombeo y verificando que el modelo los reproduzca aceptablemente. En primer lugar, debido a que los ensayos alcanzan la estabilidad de los niveles, los modelistas decidieron simular los bombeos en condiciones estacionarias y comparar los descensos en el modelo con las depresiones finales en los ensayos. Esto evita la simulación en régimen transitorio y la estimación de valores de almacenamiento (lo cual puede considerarse también como un defecto, ya que este modelo no incorpora valor alguno de almacenamiento de las formaciones). Los descensos del modelo debieron ser corregidos por el efecto del tamaño del bloque de la cuadrícula del modelo respecto al diámetro del pozo real, por un lado, y para reflejar el efecto de la penetración parcial de los pozos, por otro. En el Informe no se reportan los valores de los descensos medidos y simulados, realizándose la evaluación a través de un gráfico donde se vuelcan los abatimientos medidos y los simulados corregidos en los cuatro ensayos simulados. Los puntos muestran una tendencia a alinearse según la recta a 45 grados, pero sólo groseramente. Por lo tanto, los resultados de estas simulaciones muestran que el modelo tiende a simular correctamente los ensayos, pero sin dudas la validación no es exhaustiva.

Finalmente, el modelo se utiliza para predecir el efecto de la construcción de una presa sobre el río Paraná, en la ubicación señalada como PINDO-Í. Esta evaluación se realiza en régimen permanente, elevando las condiciones de borde de carga prescrita sobre el río Paraná a las cotas previstas en el embalse. El Informe indica que los efectos de la construcción de la presa se limitarían a una zona pequeña aledaña al embalse. Debe resaltarse que la simulación del efecto de esta obra en un modelo numérico de aguas subterráneas requeriría de un muy buen detalle en la información respecto a los espesores y propiedades hidráulicas de las distintas





formaciones en la zona del embalse. Estas condiciones no se cumplen para este caso. Es más, ninguno de los pozos utilizados en la simulación está siquiera cerca de la zona del embalse. En estas condiciones, se considera muy riesgoso establecer conclusiones sobre posibles efectos, dada la alta incertidumbre en la información de base.

## **2. Modelo Numérico Hidrogeológico del área piloto Rivera-Santana do Livramento**

A continuación, se evalúa el Informe del Modelo Numérico Hidrogeológico del Área Piloto Rivera-Santana do Livramento, preparado por David Charlesworth, Azita Assadi y Henri Sangam para SNC-Lavalin. También se analizó el modelo numérico por medio del código Visual Modflow. El modelo numérico utilizado es el MODFLOW 2000.

El área piloto cubre una extensión de 750 km<sup>2</sup> e incluye la frontera internacional que separa la ciudad uruguaya de Rivera al oeste de la ciudad brasileña de Santana do Livramento al este. La topografía varía desde menos de 135 msnm al este hasta más de 350 msnm al oeste del área estudiada. La mayor elevación del borde oeste está formada por coladas de basalto de la Fm. Arapey o Serra Geral. En otras partes del área el basalto no está presente y afloran las areniscas del Sistema Acuífero Guaraní (SAG). El agua explotada proviene principalmente del SAG.

La estratigrafía del área de estudio en cuanto al SAG y a las formaciones que la cubren y subyacen, consiste en la secuencia:

- Basalto (Fm. Arapey/Serra Geral), sólo en el borde occidental del área de estudio,
- Arenisca (Fm. Rivera/Botucatu) de origen eólico con un espesor entre 0 y 60 m en la zona, afloran a partir de los límites del basalto hacia el este,



- Arenisca (Fm. Tacuarembó/Botucatú inferior) de origen fluvial, de menor permeabilidad que las anteriores, con espesores de hasta 100 m y afloran o subafloran en el este y sur del área,
- Areniscas (Fm. Buena Vista) de menor permeabilidad debido al predominio de limos, areniscas finas y arcillas, con un espesor medio de 100 m, aflora en el extremo este del área, y
- Una secuencia de rocas generalmente de baja permeabilidad de edad Paleozoica que se apoyan sobre el basamento cristalino.
- Basamento cristalino, base del sistema.

Se considera que el SAG está constituido por las areniscas de la Fm. Rivera, de la Fm. Tacuarembó y la Fm. Buena Vista subyacente. Las dos primeras son las más importantes y afloran en el área piloto. Las unidades inferiores afloran hacia el este del área piloto. Donde está presente, el basalto de la Fm. Serra Geral constituye una capa confinante del SAG.

Se cuenta con un mapa piezométrico recientemente elaborado, con un aceptable nivel de detalle, que es utilizado como punto de partida para el modelo.

En cuanto a las propiedades hidráulicas de las areniscas del SAG, existen abundantes antecedentes en la literatura, en el marco del presente estudio se llevaron a cabo cuatro ensayos hidráulicos y, además, existe información de ensayos previos desarrollados en la construcción de 24 pozos. Toda esta información es analizada en el Informe. También existen varios estudios previos que analizan la recarga en la región, que se tomaron como punto de partida para las simulaciones, diferenciando las áreas con y sin la presencia de basalto.

El dominio del modelo numérico es algo mayor que el área piloto con el objeto de hallar condiciones de borde apropiados para el mismo.



El modelo numérico consta de siete capas para permitir flexibilidad en la carga de parámetros (algunas de estas capas son unidades hidroestratigráficas divididas): la superior constituida por el basalto (donde está presente), la segunda por la Fm. Rivera, las tercera y cuarta por la Fm. Tacuarembó, la quinta y sexta por la Fm. Buena Vista y, finalmente, la séptima para los depósitos Pérmicos subyacentes.

Los niveles iniciales para la simulación se adoptaron del mapa piezométrico antes mencionado.

En cuanto a las condiciones de borde, se adoptó una combinación de varias de ellas. En la parte norte del borde occidental se adoptó una condición de nivel constante (es la zona más alta por donde ingresa agua) y en la parte norte del borde oriental otra condición similar (es la zona más baja por donde egresa agua). En las zonas sur de los bordes occidental y oriental se fijó la condición de “río” para la capa superior e impermeable para las inferiores. Finalmente, en el borde norte y en dos tramos del borde sur se establecieron bordes impermeables. En la zona interna del dominio del modelo numérico se definieron condiciones de “río” en las zonas atravesadas por cursos de agua.

En principio, se definen dos zonas de recarga, una donde está presente el basalto y otra donde afloran las areniscas.

En cuanto a las perforaciones, se considera que todas extraen agua de las areniscas.

El modelo se ejecutó en condiciones estacionarias para realizar la calibración. La simulación se realizó con todos los pozos en operación. Se calibró mediante la metodología de prueba y error.

Los resultados de la calibración muestran parámetros estadísticos de evaluación relativamente aceptables. Entre ellos se obtuvo una desviación estándar normalizada del 10,9% (que se aproxima al valor deseable del 10%). El coeficiente



de correlación entre niveles simulados y observados es de 0,88 (mayor que 0,7). La configuración de las líneas equipotenciales obtenidas guarda similitud con el mapa equipotencial medido en algunos sectores, mientras que en otros difieren. Esto se produce principalmente en algunas zonas con poca información de pozos y cercanas a algunos bordes. Aunque sería deseable mejorar esa circunstancia, su posición está alejada de la zona de mayor interés (la zona de explotación).

Los valores de conductividades hidráulicas calibrados no se reportan en el Informe. Al final de la calibración terminaron definiéndose varias categorías de recarga: para el basalto, para la Fm. Rivera y para el afloramiento de la Fm. Tacuarembó. Sin embargo, en el Informe no se reportan sus valores.

Finalmente, se presenta un balance para las condiciones permanentes. Debe mencionarse la gran importancia de la descarga de agua por parte de los ríos. También llama la atención que la recarga figure tanto como un término de ingreso como de egreso de las aguas. Por otra parte, en el balance no figura la extracción de agua por parte de los pozos.

No se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros.

La validación del modelo se realiza simulando varios ensayos de bombeo y verificando que el modelo los reproduzca aceptablemente. Se ejecutó el modelo en régimen transitorio para simular la evolución en el tiempo de los niveles en tres ensayos de bombeo. Esto requirió densificar la malla del modelo en cercanías de los pozos de bombeo. El ajuste de los ensayos requirió de cambios locales en la conductividad hidráulica. Los abatimientos no fueron corregidos por el efecto de la relación entre el tamaño de la celda de bombeo y el tamaño real del pozo y, además, por el efecto de la penetración parcial del pozo de bombeo. Se obtienen abatimientos simulados similares a los medidos en algunos casos, mientras que en otros hay diferencias apreciables, a pesar de utilizar valores distintos para calibrar los abatimientos en el pozo de bombeo que en los pozos de observación. Por lo tanto, puede considerarse que el modelo ha sido validado sólo en forma parcial.



El objeto de la modelación predictiva fue la simulación de tres escenarios de explotación para abastecer al crecimiento futuro de la demanda. Todos los escenarios involucran la reubicación de pozos existentes. La simulación de estos escenarios se realizó en régimen transitorio, siguiéndose la evolución de los niveles en pozos estratégicamente ubicados, ya sea en la zona de nuevos bombeos como en las zonas donde se deja de bombear. En ambos casos, luego de una transición hacia un nuevo equilibrio, los niveles se estabilizan. De todas maneras, si se observa la configuración de las equipotenciales en un marco menos local, se notan pocas variaciones, por lo que la reubicación parece no arrojar mejoras sustanciales. Esto es razonable porque la reubicación es sólo relativa, y se termina extrayendo agua de la misma fuente.

Las recomendaciones expresadas al final del Informe son correctas.

### **3. Modelo Numérico Hidrogeológico del área piloto Concordia-Salto**

Se evalúa el Informe del Modelo Numérico Hidrogeológico del Área Piloto Concordia-Salto, preparado por David Charlesworth, Azita Assadi y Henri Sangam para SNC-Lavalin. También se analizó el modelo numérico por medio del código Visual Modflow. El modelo numérico utilizado es el MODFLOW 2000.

El área piloto incluye la frontera entre Argentina y Uruguay e incluye las ciudades de Concordia, del lado argentino y Salto, del lado uruguayo. El área está dividida por el río Uruguay que también delimita la frontera entre ambos países. La topografía varía entre elevaciones menores a 10 msnm cercanas al río hasta aproximadamente 60 msnm en las zonas de divisorias cercanas. Ambas ciudades son conocidas por balnearios desarrollados a partir de la explotación de aguas subterráneas termales por parte de pozos artesianos. Estas aguas termales derivan del Sistema Acuífero Guaraní (SAG).



La estratigrafía del área de estudio en cuanto al SAG y a las formaciones que la cubren y subyacen, consiste en la secuencia:

- Basalto (Fm. Arapey/Serra Geral), con un espesor cercano a 950 m,
- Arenisca (Fm. Rivera) de origen eólico con un espesor cercano a 200 m en la zona,
- Arenisca (Fm. Tacuarembó) de origen fluvial, de menor permeabilidad que las anteriores, con un espesor cercano a 100 m,
- Areniscas (Fm. Buena Vista), también fluvial, de menor permeabilidad debido al predominio de limos, areniscas finas y arcillas, con un espesor de alrededor de 400 m,
- Una secuencia de rocas generalmente de baja permeabilidad de edad Paleozoica que se apoyan sobre el basamento cristalino, y
- Basamento cristalino, base del sistema.

Los depósitos superficiales en la zona no son parte del estudio actual y no fueron considerados para el modelo.

Se considera que el SAG está constituido por las areniscas de la Fm. Rivera, de la Fm. Tacuarembó y la Fm. Buena Vista subyacente. El basalto de la Fm. Serra Geral constituye una capa confinante del SAG.

Hay escasez de información confiable acerca de los niveles piezométricos, debido a la dificultad de obtener lecturas confiables en los pozos artesianos. Sin embargo, fue posible construir un mapa de curvas piezométricas aproximado que se presenta en el Informe, a partir de los niveles registrados en ocho perforaciones.

En cuanto a las propiedades hidráulicas de las areniscas del SAG en la zona, se llevaron a cabo varios ensayos hidráulicos y, además, existe información de estudios antecedentes. Toda esta información se analiza en el Informe. Finalmente, se adopta una conductividad hidráulica de 0,6 m/d para la Fm. Rivera, 0,3 m/d para la



Fm. Tacuarembó, 0,1 m/d para la Fm. Buena Vista y 0,01 m/d para la secuencia inferior. En todos los casos se adoptó una conductividad vertical del 10% de la horizontal. En cuanto al almacenamiento específico, se adoptaron valores iniciales de  $5E-7$  para el SAG y de  $9E-9$  para los depósitos subyacentes.

El modelo numérico consta de tres capas principales: la superior constituida por el basalto, la segunda por el SAG (Fm. Rivera, Tacuarembó y Buena Vista) y la tercera para los depósitos Pérmicos subyacentes. Posteriormente se realizó una subdivisión de estas capas. La capa del basalto se estableció como inactiva, dada que, para los fines prácticos, no transmite agua.

Los niveles iniciales para la simulación se adoptaron del mapa piezométrico aproximado antes mencionado.

En cuanto a las condiciones de borde, se adoptaron condiciones de nivel fijo para todo el perímetro. Esta situación es realmente poco apropiada para un modelo, ya que condiciona excesivamente los niveles en el interior del dominio, fijando los niveles en todos sus bordes y entregando toda el agua que se extraiga en el interior, a veces creando situaciones físicamente poco realistas. Estos modelos son poco sensibles a las variaciones en los parámetros. Esto se acentúa cuando los bordes están relativamente cercanos a la zona problema, limitando las variaciones a un dominio que probablemente sea mucho más extenso. Se intentó una variante combinando condiciones de caudal impuesto en una zona y nivel fijo en otra, pero finalmente se descartó.

Dado el espesor del basalto que se apoya en las areniscas, se considera que la recarga es nula, así como la influencia de los ríos.

El modelo se ejecutó en condiciones estacionarias para realizar la calibración. Se calibró mediante la metodología de prueba y error. Como era esperable, en el Informe se reporta que el modelo resultó ser relativamente insensible a los cambios en la conductividad hidráulica de las cargas del acuífero, por lo que los niveles en los



pozos de observación terminaron ajustándose variando los niveles fijos en los bordes. Esto puede resultar en niveles relativamente ajustados, lo cual no quiere decir que el modelo esté calibrado porque responde de manera muy similar a distintos valores de conductividad hidráulica.

Los resultados de la calibración muestran parámetros estadísticos de evaluación relativamente aceptables. Sin embargo, no se comentan estos valores por carecer de valor dado lo comentado en el párrafo precedente.

No se presenta un balance para las condiciones permanentes.

No se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros.

La validación del modelo se realiza simulando varios ensayos de bombeo y verificando que el modelo los reproduzca aceptablemente. Se ejecutó el modelo en régimen transitorio para simular la evolución en el tiempo de los niveles en cuatro ensayos de bombeo. Esto requirió densificar la malla del modelo en cercanías de los pozos de bombeo. El ajuste de los ensayos requirió de cambios locales en la conductividad hidráulica. Los abatimientos no fueron corregidos por el efecto de la relación entre el tamaño de la celda de bombeo y el tamaño real del pozo y, además, por el efecto de la penetración parcial del pozo de bombeo. Se obtienen abatimientos simulados similares a los medidos, aunque debieron utilizarse valores distintos para calibrar los abatimientos en el pozo de bombeo que en los pozos de observación. Por lo tanto, puede considerarse que el modelo ha sido validado sólo en forma parcial. De hecho, cuando se incorporaron los valores de conductividad hidráulica retocados en los ensayos de bombeo en el modelo general en condiciones estacionarias, una de las perforaciones se seca. Es evidente que existe una gran incertidumbre en los valores de conductividad hidráulica, lo que deriva del problema planteado en las condiciones de borde ya comentado. Cuando se simulan los pozos bombeando para un período de 15000 días se evidencia que el cono de depresión está siendo “sostenido” por las condiciones de borde, esto es, si el dominio fuese más grande el cono se extendería.





El objeto de la modelación predictiva fue la simulación de dos escenarios en los que se simula la construcción de perforaciones adicionales. Si ya existían problemas con las condiciones de borde sin las perforaciones adicionales, su inclusión complica más el problema. En estas condiciones, el modelo no es una herramienta válida para realizar predicciones sobre el efecto de extracciones adicionales.

Las recomendaciones expresadas al final del Informe son correctas. Una recomendación adicional es la de intentar adquirir información que posibilite la ampliación del dominio a modelar. Con esto, los bordes se alejarían de la zona problema y condicionarían menos los niveles.

#### **4. Modelo Numérico Hidrogeológico del área piloto Ribeirao Preto**

A continuación, se evalúa el Informe del Modelo Numérico Hidrogeológico del Área Piloto Ribeirao Preto, preparado por Henri Sangam, Jonathan Hunt y David Charlesworth para SNC-Lavalin. También se analizó el modelo numérico por medio del código Visual Modflow. El modelo numérico utilizado es el MODFLOW 2000.

El área piloto tiene su centro en la ciudad de Ribeirao Preto, localizada en la parte norte del estado de Sao Paulo, y cubre un área aproximada de 2500 km<sup>2</sup>. El área es el centro de una intensa actividad agrícola. Debido al rápido crecimiento urbano y a las intensas actividades agrícolas e industriales, la explotación del recurso hídrico subterráneo ha crecido en forma sustantiva, produciendo una disminución significativa de los niveles del agua subterránea. El agua explotada proviene del Sistema Acuífero Guaraní (SAG).

La estratigrafía del área de estudio en cuanto al SAG y a las formaciones que la cubren y subyacen, consiste en la secuencia:



- Basalto (Fm. Serra Geral), sólo en el borde occidental del área de estudio,
- Arenisca (Fm. Botucatú) de origen eólico con un espesor entre 80 y 100 m en la zona,
- Arenisca (Fm. Piramboia) de origen fluvial, de menor permeabilidad que las anteriores, con espesores entre 100 y 300 m, y
- Areniscas, limolitas y arcilitas (Fm. Passa Dois) de baja permeabilidad, consideradas como la base del acuífero.

Se considera que el SAG está constituido por las areniscas de la Fm. Botucatú y la Fm. Piramboia subyacente. Donde está presente, el basalto de la Fm. Serra Geral constituye una capa confinante del SAG. Desde el punto de vista hidrogeológico, el techo de la Fm. Passa Dois se adopta como piso del sistema.

Se modela un área más grande que el área piloto, con el fin de encontrar situaciones físicas que puedan conceptualizarse como condiciones numéricas de borde para el modelo.

Se cuenta con un mapa piezométrico construido con niveles levantados recientemente, con un buen nivel de detalle. La recarga al sistema se produce principalmente en la zona en donde afloran las areniscas y, en segundo lugar, a través de los basaltos fracturados. En el Informe se sostiene que las descargas del sistema se producen dentro del área estudiada, por parte de la extracción de los pozos y la descarga hacia los cursos de agua. Debe decirse que, como se verá más adelante, el modelo conceptual estima que no sólo no hay descarga lateral del acuífero sino que tampoco hay ingreso de agua. Esto es, el sistema se autoabastece con la recarga local. Dadas las condiciones hidrodinámicas actuales, conceptualizadas a través del mapa equipotencial antes citado, puede decirse que esto aproximadamente se cumple, dado que las curvas equipotenciales son en general perpendiculares a los bordes del área de estudio (lo que implica ausencia de gradiente transversal a los bordes). Sin embargo, esto refleja las condiciones actuales, que pueden llegar a alterarse en el tiempo.



En cuanto a las propiedades hidráulicas de las areniscas del SAG y de los basaltos que las cubren en parte, existen abundantes antecedentes en la literatura y, además, en el marco del presente estudio se llevaron a cabo 11 ensayos hidráulicos.

El modelo consta de dos capas: la superior constituida por el basalto (donde está presente) y la inferior por las areniscas Botucatú-Piramboia.

En cuanto a las condiciones de borde, en el sector oriental se definió un borde de carga fija en coincidencia con un río. Los cursos de agua de menor importancia se simularon mediante la condición “dren”. Esto implica que los cursos reciben agua del medio subterráneo y no la ceden en todo su recorrido lo cual, en condiciones de clima húmedo, puede ser real. El límite norte y un sector del borde este del modelo se definieron como bordes de flujo nulo. Hasta aquí, todas las consideraciones sobre condiciones de borde se refieren a la capa superior. En la capa inferior todos los bordes se definieron como impermeables. Esto está apoyado en lo que se discutió anteriormente respecto a que la zona no intercambia agua con sectores aledaños.

En principio, se definen dos zonas de recarga, una donde está presente el basalto y otra donde afloran las areniscas.

En cuanto a las perforaciones, se considera que todas extraen agua de las areniscas.

El modelo se ejecutó en condiciones estacionarias para realizar la calibración. La simulación se realizó con todos los pozos en operación. En este caso, se calibró mediante la metodología de prueba y error.

Los valores iniciales de los parámetros del modelo fueron conductividades hidráulicas horizontales y verticales de 0,08 y 0,008 m/d para el basalto y de 3 y 0,3 m/d para las areniscas. También definieron 250 y 50 mm anuales de recarga para los afloramientos de areniscas y las áreas con basalto, respectivamente.



Los resultados de la calibración muestran parámetros estadísticos de evaluación buenos. Entre ellos se obtuvo una desviación estándar normalizada del 5,7% (menor al 10%) y un coeficiente de correlación entre niveles observados y simulados de 0,94 (mayor a 0,7). La configuración de las líneas equipotenciales obtenidas guarda una marcada similitud con el mapa equipotencial realizado entre 2005 y 2007.

Los valores de conductividades hidráulicas calibrados fueron de 0,86, 0,086 y 2,5 m/d para el basalto superior (fracturado), el basalto inferior y, finalmente, la arenisca. Los valores de conductividad hidráulica vertical se tomaron diez veces menores que las horizontales. Al final de la calibración terminaron definiéndose varias categorías más de recarga: los valores finales fueron de 55 mm anuales para las zonas urbanas, 225 mm para el basalto fracturado, 15 mm para el basalto sin fracturar, 200 mm para los afloramientos de areniscas y 50 mm/año para el área donde aflora el Pérmico.

Se realizaron dos simulaciones: una con todos los pozos bombeando y otra sin extracciones. Si se considera el área piloto (no toda el área modelada) en el caso con bombeo los volúmenes totales involucrados en el balance de agua son mayores, principalmente debido al ingreso de agua a través de los límites laterales. También es importante resaltar que el bombeo disminuye significativamente el aporte de agua a los cauces.

No se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros.

La validación del modelo se realiza simulando varios ensayos de bombeo y verificando que el modelo los reproduzca aceptablemente. Se ejecutó el modelo en régimen transitorio para simular la evolución en el tiempo de los niveles en seis ensayos de bombeo (cinco con pozos de observación). Esto requirió densificar la malla del modelo en cercanías de los pozos de bombeo y la subdivisión de la capa de arenisca en varias subcapas para simular los movimientos verticales de agua. El ajuste de los ensayos requirió de cambios locales y también regionales en la



conductividad hidráulica. Los abatimientos fueron corregidos por el efecto de la relación entre el tamaño de la celda de bombeo y el tamaño real del pozo y, además, por el efecto de la penetración parcial del pozo de bombeo. Efectuadas estas correcciones, se obtienen abatimientos simulados similares a los medidos, con lo que puede darse como validado el modelo. Sin embargo, si ha sido necesario corregir los valores regionales de la conductividad hidráulica para reproducir los ensayos, esto debería haberse corregido en el modelo original para volver a ejecutarlo en condiciones estacionarias con todos los pozos bombeando y verificar el efecto de estas correcciones. Debe hacerse notar que en el Informe no se reportan los valores de almacenamiento utilizados en la simulación transitoria.

El objeto de la modelación predictiva fue la simulación de tres escenarios de campos de pozos nuevos para abastecer la demanda del crecimiento demográfico e industrial futuro. Según el modelo, aunque hay alguna configuración levemente mejor que las otras, los tres escenarios producen importantes abatimientos en los niveles de agua, que no serían sostenibles más allá del año 2030. Debe hacerse notar que estas depresiones se dan con una configuración de condiciones de borde impermeables en las capas inferiores y que la influencia de los conos llega a estos bordes. En la realidad, los conos deberían atraer agua desde más allá de los bordes impermeables.

Las recomendaciones expresadas al final del Informe son correctas.



GEF



Banco Mundial



OEA

---

Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní  
Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2º piso - (CP:11200) - Tel/Fax: (598 2) 410 03 37  
e-mail: [sag@sg-guarani.org](mailto:sag@sg-guarani.org) - web: [www.sg-guarani.org](http://www.sg-guarani.org)  
Montevideo - Uruguay

---