



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



## **PROYECTO PARA LA PROTECCION AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ**

### **MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA PILOTO RIBEIRÃO PRETO**

**Contrato No. LPI/03/05**

**Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica,  
Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología Localizada de las  
Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní  
Acuífero Guaraní**

**Preparado por**

**Henri Sangam  
Jonathan Hunt  
David Charlesworth**



**SNC•LAVALIN  
International**

**Noviembre 2008**



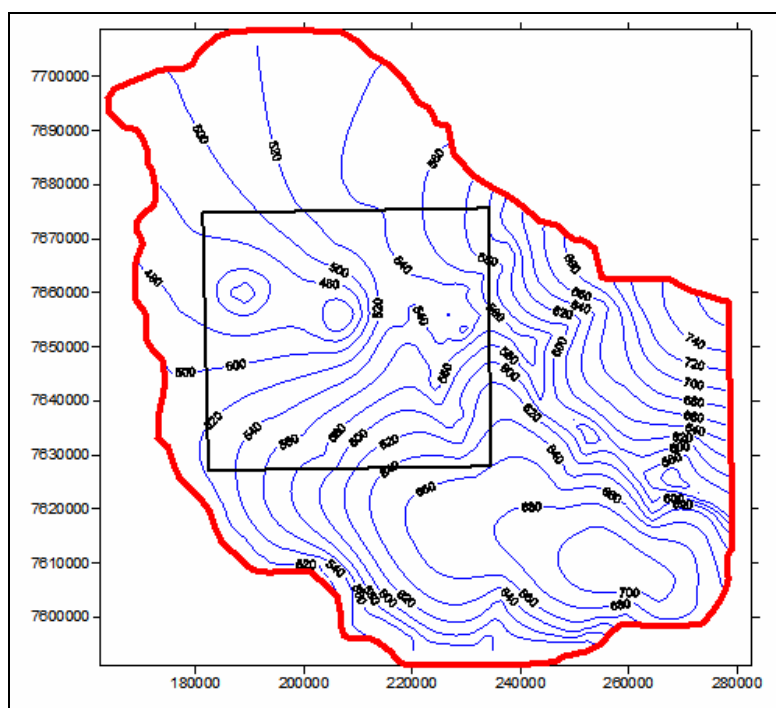
Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní



**Contrato No. LPI/03/05**

**Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica,  
Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología Localizada de las  
Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní**

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



**Modelo Numérico Hidrogeológico de Ribeirao Preto**

## **MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA PILOTO RIBEIRÃO PRETO**



**SNC•LAVALIN  
International**



## Equipo del Proyecto

### Responsables Nacionales:

Por Argentina  
Por Brasil  
Por Paraguay  
Por Uruguay

Fabián López  
João Bosco Senra  
Carlos López Dose  
Víctor Rossi

### Coordinadores Nacionales:

Argentina

Miguel Ángel Giraut  
María Josefa Fioritti (Co-coordinadora)  
María Santi (Co-coordinadora)  
João Bosco Senra  
Elena Benítez  
Lourdes Batista

Brasil  
Paraguay  
Uruguay

### Representantes OEA:

Jorge Rucks  
Carlos Sténeri

### Representantes Banco Mundial:

Abel Mejía  
Douglas Olson  
Samuel Taffesse  
Karin Kemper

### Secretaría General:

Secretario General  
Coordinador Técnico  
Coordinador Técnico  
Coordinador de Comunicación  
Asistente técnico  
Auxiliar técnico  
Administración  
Auxiliar Administrativa  
Secretaria Bilingüe

Luiz Amore  
Jorge Santa Cruz  
Daniel García Segredo  
Roberto Montes  
Alberto Manganelli  
Santiago Ferrero  
Luis Reolón  
Alejandra Griotti  
Mariángel Valdés

### Facilitadores proyectos piloto:

Concordia – Salto  
Rivera – Santana  
Itapúa  
Ribeirão Preto

Enrique Massa Segui  
Achyilles Bassedas  
Alicia Eisenköbl  
Mauricio Santos



## Lista de Distribución:

<b>SNC-LAVALIN INTERNATIONAL</b>		
Steve Lindley	Gerente del Proyecto	(1)
Adriana Lafleur	Director Técnico del proyecto	(1)
Sandra Roldán	Archivo y Control del Proyecto	(2)
Doug Hodgins	Director Corporativo	(1)
Sam Khattab	Director de Calidad Corporativo	(1)
<b>ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS, OEA</b>		
Luiz Amore	Secretario General	(1)
Jorge Santa Cruz	Gerente de Servicios	(1)
<b>EMPRESAS ASOCIADAS</b>		
Valter Galdiano	DH	(1)
Mario Nascimento Souza	DH	(1)
Hector Gabriel Santarelli	PROINSA	(1)
Daniel Boggetti	P y T	(1)
Maria Luisa Rodríguez	LCV	(1)
Gerardo Rezoagli	GEODATOS	(1)



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1.0</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>2.0</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>14</b>
2.1	ENTORNO FÍSICO.....	14
2.2	MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	14
<b>3.0</b>	<b>EL MODELO CONCEPTUAL PARA RIBEIRÃO PRETO .....</b>	<b>16</b>
3.1	DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL .....	16
3.2	EL MARCO GEOLÓGICO .....	17
3.3	MARCO HIDROGEOLÓGICO .....	23
3.3.1	<i>Principales unidades hidroestratigráficas.....</i>	<i>24</i>
3.3.2	<i>Componentes del Acuífero Guaraní.....</i>	<i>24</i>
3.3.3	<i>Estructura geológica del área de estudio.....</i>	<i>24</i>
3.3.4	<i>Sistema de flujo del agua subterránea.....</i>	<i>25</i>
3.3.5	<i>Recarga.....</i>	<i>26</i>
3.3.6	<i>Descarga.....</i>	<i>28</i>
3.3.7	<i>Propiedades hidráulicas.....</i>	<i>29</i>
<b>4.0</b>	<b>EL MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>31</b>
4.1	EL CÓDIGO DE MODELACIÓN .....	31
4.2	DOMINIO DEL MODELO Y CONDICIONES DE BORDE .....	32
4.3	LA CUADRÍCULA DEL MODELO .....	32
4.4	LAS CAPAS DEL MODELO .....	35
4.5	CONDICIONES DE BORDE .....	37
4.6	FUENTES Y SUMIDEROS .....	38
<b>5.0</b>	<b>CALIBRACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>42</b>
5.1	ENFOQUE DE LA CALIBRACIÓN.....	42
5.2	VALORES INICIALES .....	43
5.3	RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN .....	45
<b>6.0</b>	<b>VALIDACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>57</b>
<b>7.0</b>	<b>MODELACIÓN PREDICTIVA.....</b>	<b>62</b>
7.1	OBJETIVOS .....	62
7.2	ESCENARIOS.....	64
7.3	RESULTADOS DE LA PREDICCIÓN.....	65
7.3.1	<i>Escenario 1.....</i>	<i>65</i>
7.3.2	<i>Escenario 2.....</i>	<i>69</i>
7.3.3	<i>Escenario 3.....</i>	<i>69</i>
<b>8.0</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>74</b>
8.1	LIMITACIONES DEL MODELO NUMÉRICO .....	74
8.2	RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO .....	75
8.3	RECOMENDACIONES.....	75



## LISTA DE TABLAS

TABLA 1: UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS EN EL ÁREA PILOTO RIBEIRÃO PRETO (BRASIL) Y SUS CORRELACIONES CON LAS UNIDADES EN PARAGUAY, ARGENTINA Y URUGUAY .....	17
TABLA 2: EXTRACCIÓN DE AGUA .....	29
TABLA 3: PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL BASALTO SERRA GERAL .....	29
TABLA 4: PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LAS ARENISCAS DEL SAG .....	30
TABLA 5: PARÁMETROS UTILIZADOS CON WHS SOLVER .....	42
TABLA 6: CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS INICIALES ESTIMADAS .....	45
TABLA 7: TASAS DE RECARGA INICIALES .....	45
TABLA 8: COMPARACIÓN DE NIVELES DE AGUA OBSERVADOS Y CALCULADOS .....	46
TABLA 9: RESUMEN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	49
TABLA 10: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA CALIBRADA .....	52
TABLA 11: TASAS DE RECARGA CALIBRADAS .....	52
TABLA 12: BALANCE HÍDRICO PARA EL ÁREA PILOTO .....	56
TABLA 13: DETALLES DE LOS ENSAYOS HIDRÁULICOS .....	57
TABLA 14: RESULTADOS SIMULADOS VERSUS OBSERVADOS PARA LOS ENSAYOS HIDRÁULICOS .....	59
TABLA 15: RESUMEN DE PROYECCIÓN DE POBLACIÓN PARA EL ÁREA RIBEIRÃO PRETO .....	62
TABLA 16: RESUMEN DE CRECIMIENTO DE POBLACIÓN Y DEMANDA DE AGUA PARA EL MUNICIPIO DE RIBEIRÃO PRETO (SEGÚN GUIDO, 2004) .....	64
TABLA 17: RESUMEN DE CAUDALES DE BOMBEO (m <sup>3</sup> /DÍA) DEL MODELO PARA ANÁLISIS DE ESCENARIOS .....	65
TABLA 18: RESUMEN DE CARGAS PREDICHAS PARA EL ESCENARIO 1 .....	65
TABLA 19: RESUMEN DE CARGAS PRONOSTICADAS PARA EL ESCENARIO 2 .....	69
TABLA 20: RESUMEN DE CARGAS PRONOSTICADAS PARA EL ESCENARIO 3 .....	72

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EXTENSIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ Y UBICACIÓN DE LAS ÁREAS PILOTO .....	12
FIGURA 2: LÍMITES DEL ÁREA PILOTO .....	15
FIGURA 3: UBICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES .....	18
FIGURA 4: SECCIÓN TRANSVERSAL AA .....	19
FIGURA 5: SECCIÓN TRANSVERSAL BB .....	20
FIGURA 6: SECCIÓN TRANSVERSAL CC .....	21
FIGURA 7: CURVAS PIEZOMÉTRICAS DE LAS ARENISCAS BOTUCATÚ/PIRAMBOIA .....	27
FIGURA 8: DOMINIO DEL MODELO .....	33
FIGURA 9: CUADRÍCULA DEL MODELO .....	36
FIGURE 10A - LÍMITES DE LA CAPA 1 .....	39
FIGURE 10B - LÍMITES DE LAS SUB-CAPAS 2A Y 2B .....	39
FIGURA 10: LÍMITES DEL MODELO .....	39
FIGURA 11: UBICACIÓN DE POZOS DE EXTRACCIÓN .....	41
FIGURA 12: UBICACIÓN DE POZOS DE CALIBRACIÓN .....	44
FIGURA 13: CARGAS CALCULADAS VS. CARGAS OBSERVADAS – RÉGIMEN PERMANENTE .....	50
FIGURA 14: CARGAS MODELADAS EN EL SAG .....	51
FIGURA 15: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE RESIDUALES .....	53
FIGURA 16: HISTOGRAMA DE RESIDUALES DE CALIBRACIÓN .....	54
FIGURA 17: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE TASA DE RECARGA .....	55
FIGURA 18: UBICACIÓN DE ENSAYOS HIDRÁULICOS .....	58
FIGURA 19: MÁXIMO ABATIMIENTO PRONOSTICADO VS MÁXIMO ABATIMIENTO OBSERVADO .....	61
FIGURA 20: PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO Y FUTURA DEMANDA ADICIONAL DE AGUA EN LA MUNICIPALIDAD DE RIBEIRÃO PRETO .....	63
FIGURA 21: UBICACIÓN DE POZOS PARA ESCENARIOS .....	66
FIGURA 22: CARGAS PRONOSTICADAS PARA ESCENARIO 1 .....	67
FIGURA 23: CARGAS PRONOSTICADAS PARA EL AÑO 2050 CON ESCENARIO 1 .....	68
FIGURA 24: CARGAS PRONOSTICADAS PARA ESCENARIO 2 .....	70
FIGURA 25: CARGAS PRONOSTICADAS PARA EL AÑO 2050 CON ESCENARIO 2 .....	71
FIGURA 26: CARGAS PRONOSTICADAS PARA EL AÑO 2050 CON ESCENARIO 3 .....	73



## AVISO

*El presente documento expresa la opinión profesional del Proveedor de Servicios sobre los asuntos aquí expuestos, aplicando su criterio profesional y procediendo con cuidado razonable. Debe leerse en el contexto del Contrato de “Servicios de Inventario y Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizada de las Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní” con fecha del 15 de Marzo de 2006 (el “Contrato”) entre SNC-Lavalin International, el Proveedor de Servicios y La Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (SG-OEA)\_ (el “Cliente”), de la metodología, los procedimientos y las técnicas utilizados por el Proveedor de Servicios, las suposiciones del Proveedor de Servicios, y las circunstancias y restricciones bajo las cuales su mandato se llevó a cabo. Este documento fue redactado únicamente para fines del objetivo estipulado en el Contrato, y para beneficio exclusivo del Cliente, cuyos recursos se limitan a aquellos expuestos en el Contrato. Este documento debe leerse como un todo y, por lo tanto, el lector no deberá leer sus partes y secciones, o depender de éstas fuera de contexto.*

*En la preparación de cualquier estimación de valores técnicos o costos, el Proveedor de Servicios siguió una metodología y procedimientos, y procedió con cuidado prudente, a fin de ser congruente con el nivel de precisión buscado, aplicando su criterio y cuidado razonable y por tanto, en su opinión, es muy probable que los valores técnicos o costos reales serán compatibles con la estimación. Sin embargo, no debe implicarse garantía alguna en cuanto a la exactitud de las estimaciones. Salvo que se estipule expresamente lo contrario, las suposiciones, los datos y la información proporcionada por, o recopilada de otras fuentes (incluyendo el Cliente, consultores, laboratorios de prueba y proveedores de equipo, etc.) en los que se basa la opinión del Proveedor de Servicios, tal como se expresa en el presente, no fueron verificados por el Proveedor de Servicios. El Proveedor de Servicios no hace ninguna representación en cuanto a su exactitud y declina toda responsabilidad a este respecto, más allá de la responsabilidad expresamente establecida en el Contrato.*

*Dentro de los límites permitidos por las leyes aplicables y por el Contrato, el Proveedor de Servicios declina toda responsabilidad al Cliente y a terceras partes en cuanto a la publicación, referencia, cita o distribución de este informe o de cualquier parte de su contenido a una tercera parte y la dependencia en los mismos por ésta.*



## RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, acordado entre los Gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y el Banco Mundial (BM), la firma SNC-Lavalin International Inc. recibió el mandato de parte de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA), agencia ejecutora del proyecto; para llevar a cabo el estudio de “Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizada de las Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní”.

Este informe describe la elaboración, calibración, validación y uso del modelo numérico del área piloto denominada Ribeirão Preto, según los requerimientos establecidos por la OEA, para analizar la **Hidrogeología local de las áreas piloto**.

Los términos de referencia de este proyecto requerían la construcción de modelos de flujo por computador para las cuatro áreas piloto dentro del Sistema Acuífero Guaraní. Este informe describe la construcción, calibración, validación y uso del modelo numérico para el área piloto conocida como Ribeirão Preto.

El área piloto tiene como centro a la ciudad de Ribeirão Preto, e incluye las ciudades de Jardinópolis, Sertãozinho, Dumont, Serrana, Serra Azul, Cravinhos y Pradópolis. Durante décadas se han observado incrementos en la demanda de agua subterránea y reducciones en los niveles piezométricos del agua medidos, lo cual indica un hundimiento del nivel del agua.

Las aguas se derivan principalmente del Sistema Acuífero Guaraní, el cual consiste en areniscas triásicas y jurásicas que se encuentran confinadas en la parte occidental del área piloto debajo de flujos de basalto que alcanzan un espesor de casi 200 m dentro del área de estudio. Las areniscas afloran dentro de la mitad oriental del área piloto. El acuífero yace directamente encima de rocas de la edad pérmica que consisten en una secuencia de fangolitas, areniscas y limos finos, los cuales, aunque almacenan agua, son menos permeables que el acuífero suprayacente. Las rocas paleozoicas yacen sobre rocas cristalinas de baja permeabilidad del basamento precámbrico.

La recarga del acuífero es predominantemente a través de la precipitación sobre las áreas de afloramiento. A escala regional el movimiento de agua subterránea parece ir en dirección este a oeste aunque, debido a la sobreexplotación durante décadas del acuífero en el municipio de Ribeirão Preto, los niveles de agua han descendido significativamente, creando un cono de depresión dentro del área urbana de la ciudad.





En este estudio se eligió el programa MODFLOW 2000 como código de simulación numérica. La experiencia en modelación de sitios complejos sugiere que los modelos MODFLOW debidamente diseñados son adecuados para la simular el flujo de agua subterránea en ambientes complejos. MODFLOW es capaz de simular el flujo tridimensional del agua subterránea en régimen permanente y transitorio en una variedad de ambientes que van desde simples hasta complejos.

Se seleccionó Visual MODFLOW 4.2 Pro, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc., como la interfase gráfica para usuarios debido a que permite una fácil entrada de datos y una rápida salida de resultados. El modelo se arma con una cuadrícula en forma cuadrada o rectangular. Al agregar capas en la dirección vertical los nodos se convierten en cubos tridimensionales o sólidos rectangulares. Durante el desarrollo del modelo la cuadrícula, el ingreso de datos y los resultados del modelo pueden visualizarse en vista en planta y en secciones transversales en cualquier momento.

El área piloto Ribeirão Preto tiene 52 km de ancho y 49 km de largo, y se escogió un dominio del modelo basado en los límites naturales, asegurando que los bordes del modelo estuvieran mas allá de los límites reales del área piloto. Los parámetros que se introdujeron en el modelo incluyen: topografía, geología, hidrogeología (es decir las superficies superiores e inferiores de los acuíferos y acuitardos, la conductividad hidráulica), y las alturas de las corrientes.

Para los fines del presente estudio la primera unidad significativa es el basalto grueso de la formación Serra Geral, la cual es de la era cretácea y constituye una capa de muy baja permeabilidad confinante del acuífero subyacente. Para los propósitos de este ejercicio de modelación se consideró que el Sistema Acuífero Guaraní incluye los sedimentos de las formaciones Botucatu y Piramboia, cuyas edades varían entre el jurásico tardío y el triásico, y representan una secuencia sedimentaria.

El Acuífero Guaraní yace sobre una secuencia de rocas sedimentarias de la era pérmica y generalmente de baja permeabilidad, las que, a su vez, yacen sobre el basamento cristalino precámbrico. Para fines de modelación el basamento fue considerado impermeable y por lo tanto funciona como un acuícludo inferior.

Inicialmente se ejecutó un modelo en régimen permanente, con pozos en operación. La calibración del modelo se logró mediante un procedimiento de prueba y error, al comparar las cargas hidráulicas simuladas y las cargas observadas en los pozos. Una vez se calibró el modelo en régimen permanente, se usó una versión en régimen transitorio para duplicar los resultados de los ensayos hidráulicos para cada pozo donde había información disponible. Las cargas piezométricas derivadas del modelo en régimen permanente se usaron como datos de entrada para el modelo en régimen transitorio.



El principal objetivo del modelo en computador del área piloto Ribeirão Preto es ayudar en la planificación del desarrollo futuro del agua subterránea compartida por las áreas circundantes. La predicción del incremento en la demanda de agua subterránea estuvo precedida por la predicción del crecimiento poblacional, usando un factor apropiado para tener en cuenta el consumo doméstico, industrial, comercial e institucional, y las pérdidas del sistema. Con este fin se desarrollaron tres escenarios: el primero representa la adición de cinco campos de pozos nuevos a lo largo del límite oriental del área piloto, dentro del área de afloramiento; el segundo representa la adición de cinco campos de pozos nuevos al sur de la ciudad de Ribeirão Preto; y el tercero representa una demanda compartida entre todos los diez campos de pozos.

Se concluyó que los elevados caudales de extracción necesarios para satisfacer la demanda predicha de agua para el año 2050 producirían abatimientos significativos del agua dentro del acuífero. Las predicciones del modelo simulan abatimientos equivalentes a todo el espesor local del acuífero, lo que sugiere que el diseño y ubicación del campo de pozos serán muy importantes en el desarrollo y gestión adicional de los recursos de agua subterránea de las áreas.

El informe incluye recomendaciones sobre la necesidad de recolectar nueva información confiable relacionada con las cargas piezométricas y caudales de extracción de agua subterránea, y resalta que uno de los defectos del presente modelo numérico de Ribeirão Preto es el hecho de que los caudales de bombeo simulados en el modelo en régimen permanente variaron considerablemente para satisfacer la demanda actual estimada.



## 1.0 INTRODUCCIÓN

En el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, acordado entre los Gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y el Banco Mundial (BM), la firma SNC-Lavalin International Inc. recibió el mandato de parte de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA), agencia ejecutora del proyecto; para llevar a cabo el estudio de “Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizada de las Áreas Operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní”.

Este informe describe la elaboración, calibración, validación y uso del modelo numérico del área piloto denominada Ribeirão *Preto*, según los requerimientos establecidos por la OEA, para analizar la **Hidrogeología local de las áreas piloto**.

Los términos de referencia del proyecto requerían la construcción de modelos numéricos de flujo para las cuatro áreas piloto dentro del Sistema Acuífero Guaraní. Este informe describe la construcción, calibración, validación y uso del modelo numérico para el área piloto conocida como Ribeirão Preto.

Ribeirão Preto es una de las cuatro áreas piloto que se están estudiando en el Sistema Acuífero Guaraní, uno de los acuíferos transfronterizos más importantes del mundo (Zektser y Everett, 2006; Araújo et. al, 1999). SNC-Lavalin ha desarrollado un modelo numérico del flujo de agua subterránea para simular el flujo de agua subterránea en la cuenca hidrográfica que contiene el área de estudio. Este informe presenta la metodología y los resultados del estudio. La ubicación del área piloto se presenta en la Figura 1.

El área piloto tiene su centro en la ciudad de Ribeirão Preto, localizada en la parte norte del Estado de São Paulo. La ciudad en sí tiene un área de 651 km<sup>2</sup> ([www.ribeiraopreto.sp.gov.br](http://www.ribeiraopreto.sp.gov.br)) y el área piloto cubre un área de aproximadamente 2.500 km<sup>2</sup>.

Esta área es el centro de la actividad agrícola, ya que es la región de mayor producción de azúcar y alcohol en el mundo, con áreas extensas de cultivo de caña de azúcar y árboles cítricos. En la región existen, entre otras, industrias de procesamiento de soja, café, alimentos, víveres e industrias de fertilizantes. Debido al rápido crecimiento urbano y a las intensas actividades agrícolas e industriales, ha habido un gran desarrollo de los recursos de agua subterránea, principalmente del Acuífero Guaraní, lo que ha resultado en una



Figura 1: Extensión del Sistema Acuífero Guaraní y ubicación de las áreas piloto



disminución significativa en los niveles de agua subterránea, especialmente dentro de la ciudad de Ribeirão Preto. Basándose en la comparación realizada entre el nivel piezométrico inicial cuando se perforaron los pozos y los niveles en pozos inactivos en el año 2002, Guido (2004) observó un abatimiento de hasta 60 m en el Pozo 116, ubicado dentro de la zona nororiental de la ciudad. Estudios sobre conos de depresión dentro de la ciudad de Ribeirão Preto realizados por Monteiro (2003) and Montenegro (1990) llegaron a conclusiones similares. Para el desarrollo del modelo se consideraron estudios del área específica de Ribeirão Preto realizados por varios autores incluyendo SMA/São Paulo & StMUGV/Baviera, (2004), RABELO (2005), Iritani e Hirata (2006) y Cavicchia (2007).

El modelo de flujo de agua subterránea que se presenta en este informe es uno de varios estudios llevados a cabo para mejorar el sistema de agua subterránea local y, por lo tanto, ayudar en la gestión de los recursos del Acuífero Guaraní. El objetivo específico de la modelación es desarrollar, calibrar y ensayar un modelo numérico de agua subterránea del área de estudio Ribeirão Preto. El modelo también servirá para examinar el impacto de futuros campos de pozos que se podrían necesitar para ayudar a satisfacer las demandas futuras de agua. El modelo desarrollado para este estudio podrá servir más adelante como plataforma para analizar los efectos potenciales de las explotaciones de los recursos de agua subterránea y para la evaluación de los posibles efectos a escala regional causados por los desarrollos agrícolas sobre la calidad del agua.



## **2.0 ANTECEDENTES**

### **2.1 Entorno físico**

El área piloto cubre la ciudad de Ribeirão Preto y el área suburbana circundante, incluyendo Sertãozinho, Serrana, Jardinópolis, Cravinhos y Altinópolis. El río Pardo, tributario del río Grande, que fluye en dirección oeste hacia el río Paraná, entra por el lado oriental del área de estudio, fluye en dirección noroeste pasando cerca del extremo norte del área metropolitana de Ribeirão Preto, continúa en dirección noroeste y finalmente sale del área piloto al noroeste de Ribeirão Preto. El mapa base que se presenta en la Figura 2 muestra las principales características topográficas del área.

Según información disponible (SG-SAG, 2005, 2006, 2007), la pendiente general del área Ribeirão Preto es hacia el oeste y los sitios más altos se encuentran en las altiplanicies orientales (860 metros al sur de Serrana y 866 metros en la esquina nororiental), y los más bajos se encuentran en el noroeste, en la planicie del río Pardo, a 540 metros de altura. La topografía es ligeramente ondulada, los gradientes de las laderas varían entre 1% (en la planicie aluvial del río Pardo) y 3-5% en las laderas y divisorias de aguas, aumentando hasta 10-20% en las escarpas.

### **2.2 Marco hidrogeológico**

El agua suministrada en el área proviene principalmente del Acuífero Guaraní o Sistema Acuífero Guaraní (SAG). Se puede decir sencillamente que el acuífero está compuesto por una secuencia sedimentaria de areniscas en su mayoría de la era triásica a jurásica, que en la parte occidental del área piloto yacen debajo de flujos de basalto que actúan como un acuífero y un acuitardo, dependiendo del grado de fracturación. En los demás sitios el acuífero aflora sobre un área de cerca de 360 kilómetros cuadrados.

Las areniscas que conforman el acuífero yacen directamente encima de rocas de la edad Pérmica que consisten en secuencias de fangolitas, areniscas finas, limos, etc., las cuales, a pesar de ser portadoras de agua, son menos permeables que el acuífero suprayacente.

El agua subterránea del Acuífero Guaraní en el área piloto proviene del área de recarga ubicada hacia el este, donde aflora el acuífero, y fluye gradiente abajo en dirección oeste, en general.



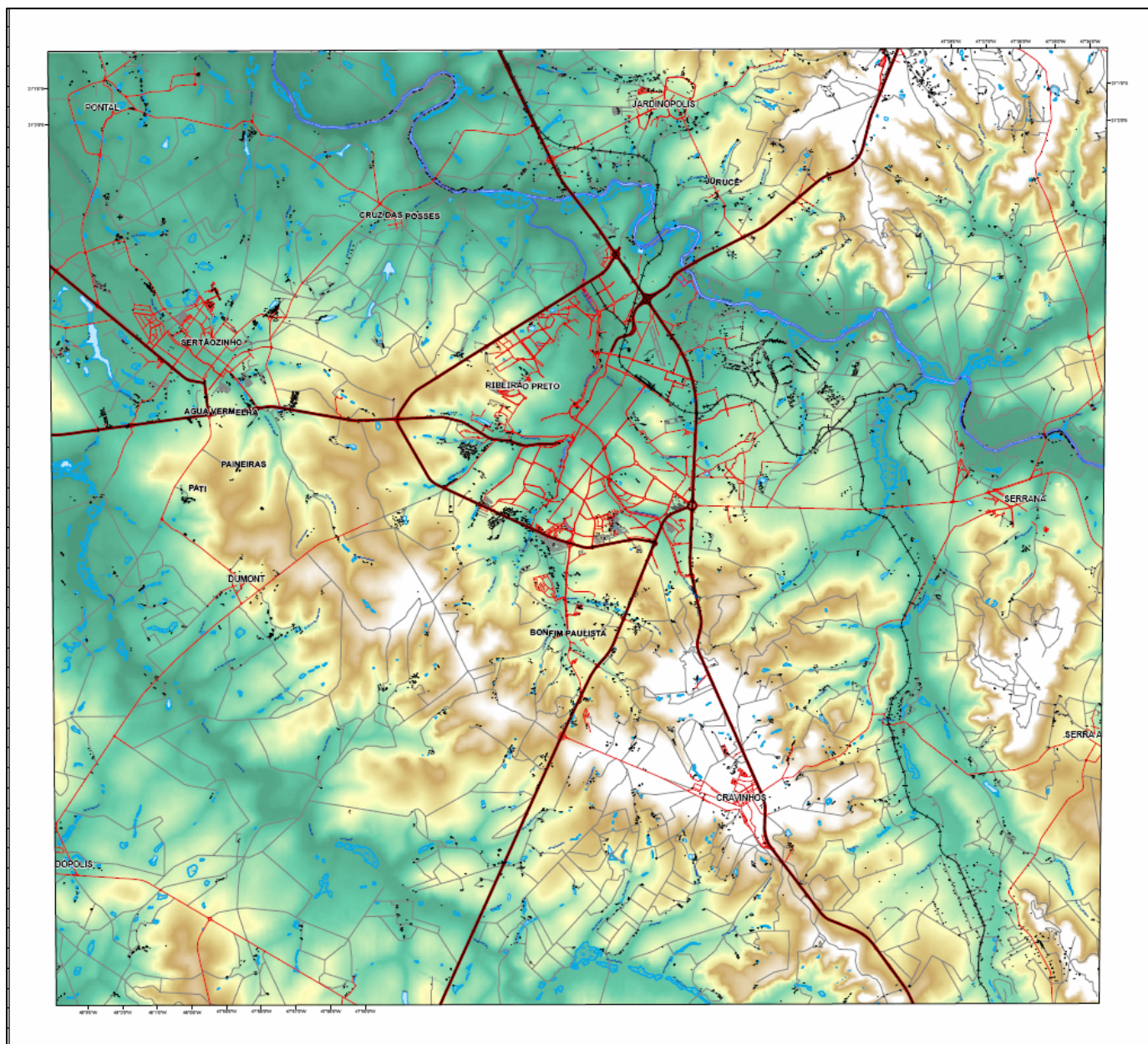


Figura 2: Límites del Área piloto



### **3.0 EL MODELO CONCEPTUAL PARA RIBEIRÃO PRETO**

#### **3.1 Desarrollo de un Modelo conceptual**

Para desarrollar un modelo matemático es necesario tener primero un entendimiento claro de la ocurrencia y movimiento del agua subterránea en el área de interés, es decir, es necesario desarrollar un modelo conceptual que identifique los procesos y elementos físicos relevantes que controlan el flujo de agua subterránea en el acuífero. El modelo conceptual dicta entonces de qué manera se convierte el mundo real al modelo matemático.

Un modelo conceptual es simplemente la comprensión de los procesos que constituyen un sistema real; en el contexto hidrológico esto equivale a la comprensión del sistema de flujo de agua subterránea. El modelo conceptual identifica y describe los procesos y elementos físicos que controlan el flujo de agua subterránea en el área de estudio, tales como el marco geológico, el marco hidrológico, las propiedades de los acuíferos y las fuentes de recarga y descarga. Sin embargo, dado que el modelo conceptual es simplemente una idea o un entendimiento (es decir, un concepto), es necesario describirlo por medio de mapas, superficies, secciones transversales y texto relacionado. Esto requiere la recopilación e interpretación de una gran variedad de información.

En otras palabras, un modelo conceptual representa una síntesis de la información disponible que, en este estudio, fueron la base de datos de los pozos de agua y las superficies hidrogeológicas derivadas de esa base de datos. La información necesaria incluye la topografía, el espesor del acuícludo, el espesor del acuífero y las superficies piezométricas. Además, también se utilizó la información de los informes geológicos e hidrogeológicos disponibles así como también la información de los ensayos hidráulicos.

Los pasos claves para la formulación de un modelo conceptual incluyen la definición de las unidades hidroestratigráficas, la preparación del balance hídrico y la definición del sistema de flujo de agua subterránea. Sin embargo, el desarrollo de un modelo conceptual y la construcción del modelo informático involucran algo de simplificación y clasificación de la información, ya que no es factible la reconstrucción completa del sistema real, con todas sus complejidades.

La recopilación de la información depende de algunos factores específicos del lugar, tales como la amplitud de trabajos previos y el alcance y presupuesto para hacer nuevas investigaciones de campo. Sin embargo, en general, esta recopilación de información incluye lo siguiente, si se encuentra disponible:





- Informes publicados que describan la geología e hidrogeología regional.
- Informes sobre investigaciones hidrogeológicas locales (por ejemplo, trabajos de consultores, académicos y organismos gubernamentales).
- Mapas topográficos y geológicos publicados; fotografías aéreas.
- Registros de pozos para monitoreo, producción o exploración (incluyendo pozos de exploración de agua, petróleo, gas y minerales).
- Documentos de investigación, tesis de grado de maestrías y doctorados.
- Datos de niveles de agua subterránea, tanto estáticos como durante el bombeo, obtenidos de pozos de monitoreo y de pozos de producción.

### 3.2 El marco geológico

El marco geológico describe la distribución, configuración y estructura física de los acuíferos subyacentes y de las unidades confinantes. Los factores importantes a tener en cuenta son el espesor y continuidad de las unidades, las litologías representativas dentro de las unidades, y la estructura geológica de las unidades. En la Tabla 1 se presentan los nombres y las equivalencias de las unidades en Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay. Basándose en información clave y representativa de los pozos se desarrolló una serie de tres (3) secciones transversales para ilustrar las interconexiones entre las distintas unidades geológicas presentes dentro del área piloto y sus alrededores. En la Figura 3 se observa la ubicación en planta de estas secciones transversales y en las Figuras 4 a 6 se muestran dichas secciones.

**Tabla 1: Unidades litoestratigráficas en el área piloto Ribeirão Preto (Brasil) y sus correlaciones con las unidades en Paraguay, Argentina y Uruguay**

ERA	Brasil	Paraguay	Argentina	Uruguay
<b>Cretáceo inferior y medio</b>	Serra Geral y areniscas intertrap	Alto Paraná y Misiones intertrap	Serra Geral y Solari intertrap	Arapey y areniscas intertrap
<b>Jurásico</b>	Botucatú	A) Fm. Misiones (superior: principalmente eólica) B) Fm. Misiones (inferior: principalmente fluvial)		Tacuarembó Superior (Rivera) Tacuarembó Inferior
<b>Triásico</b>	Piramboia			Buena Vista
<b>Pérmico</b>	Grupo Passa Dois	Grupo Independencia		Grupo Melo
<b>Carbonífero Superior</b>	Grupo Tubarão			Formación San Gregorio - Tres Islas

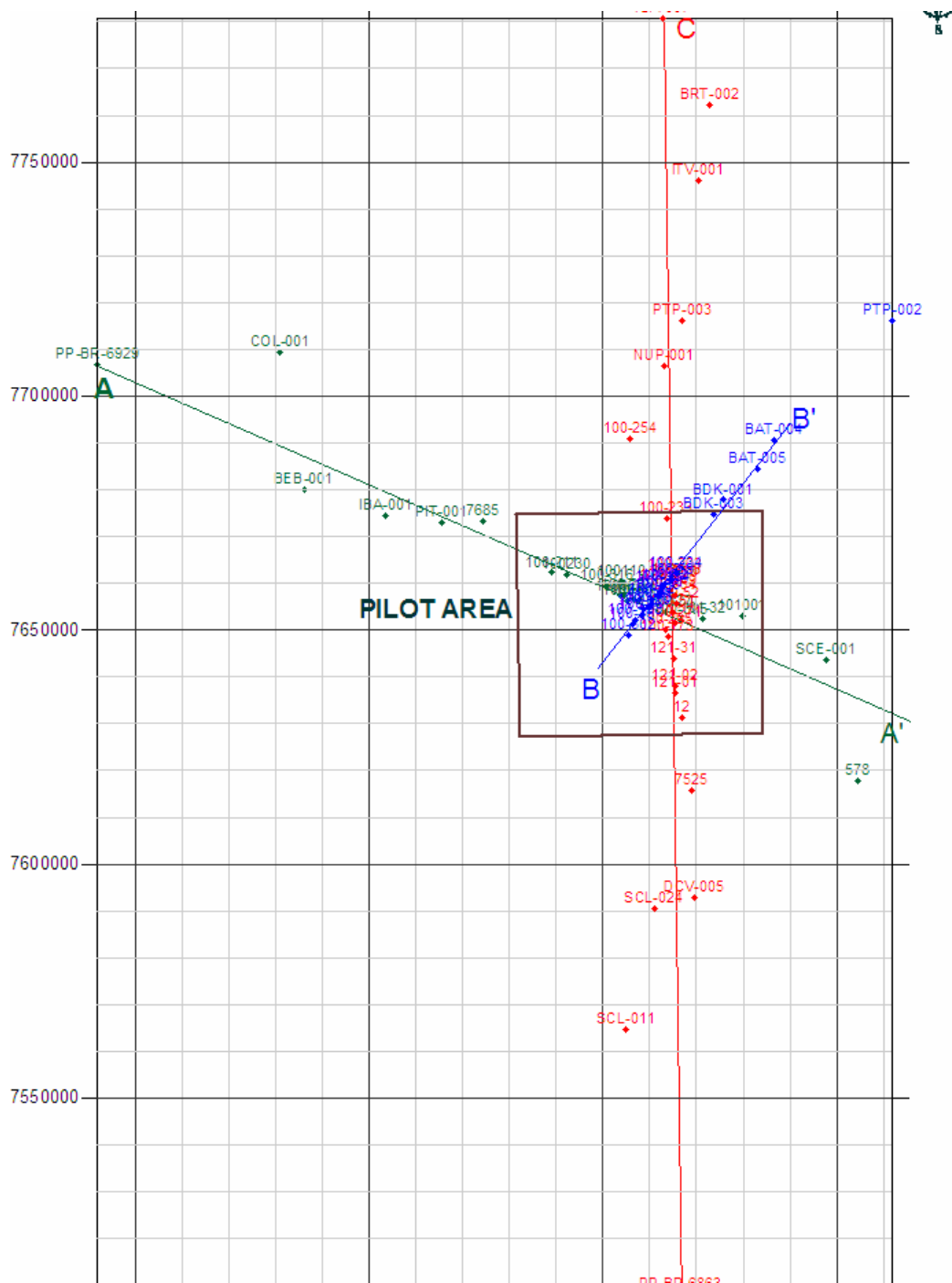


Figura 3: Ubicación de Secciones transversales



**SNC-LAVALIN**  
International

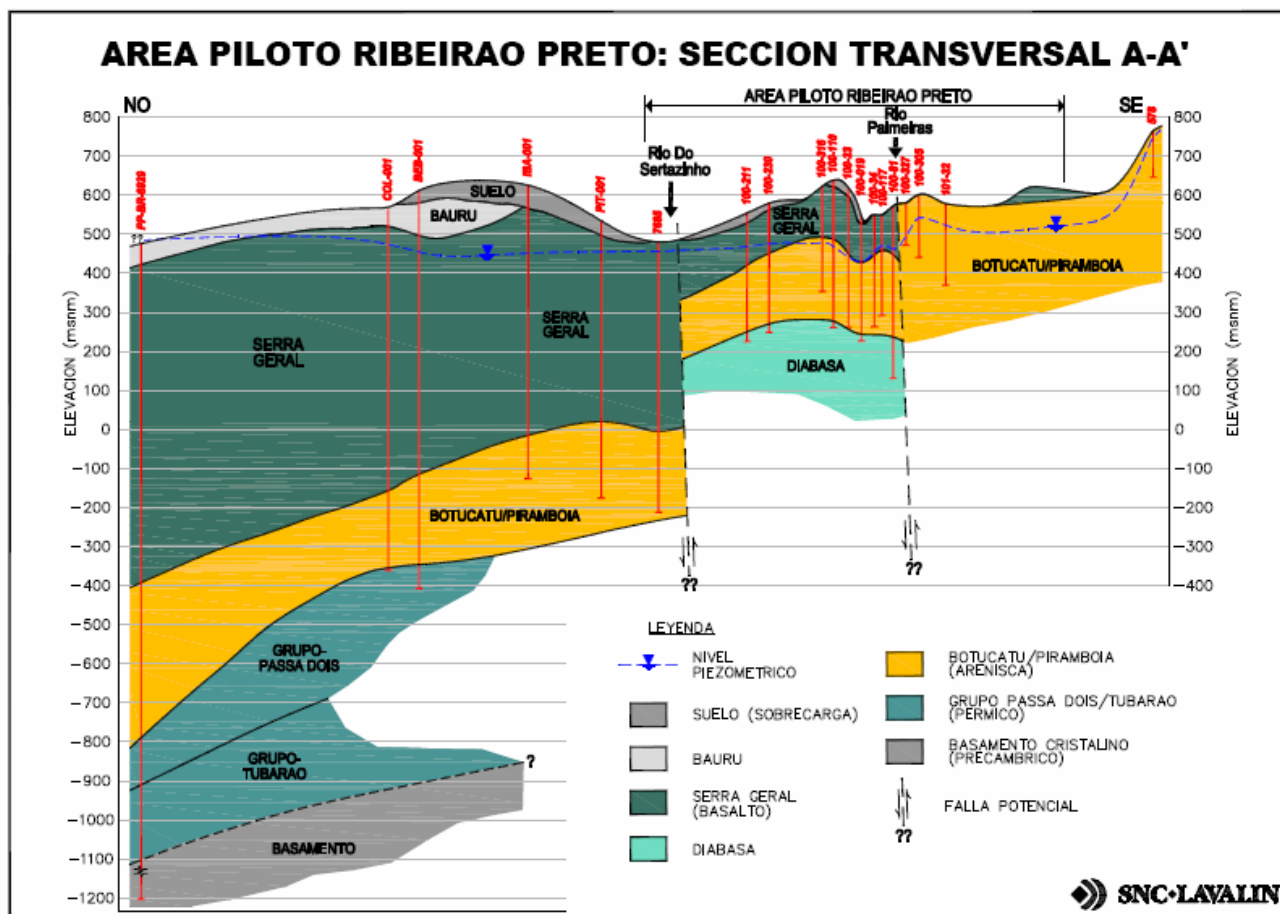


Figura 4: Sección transversal AA

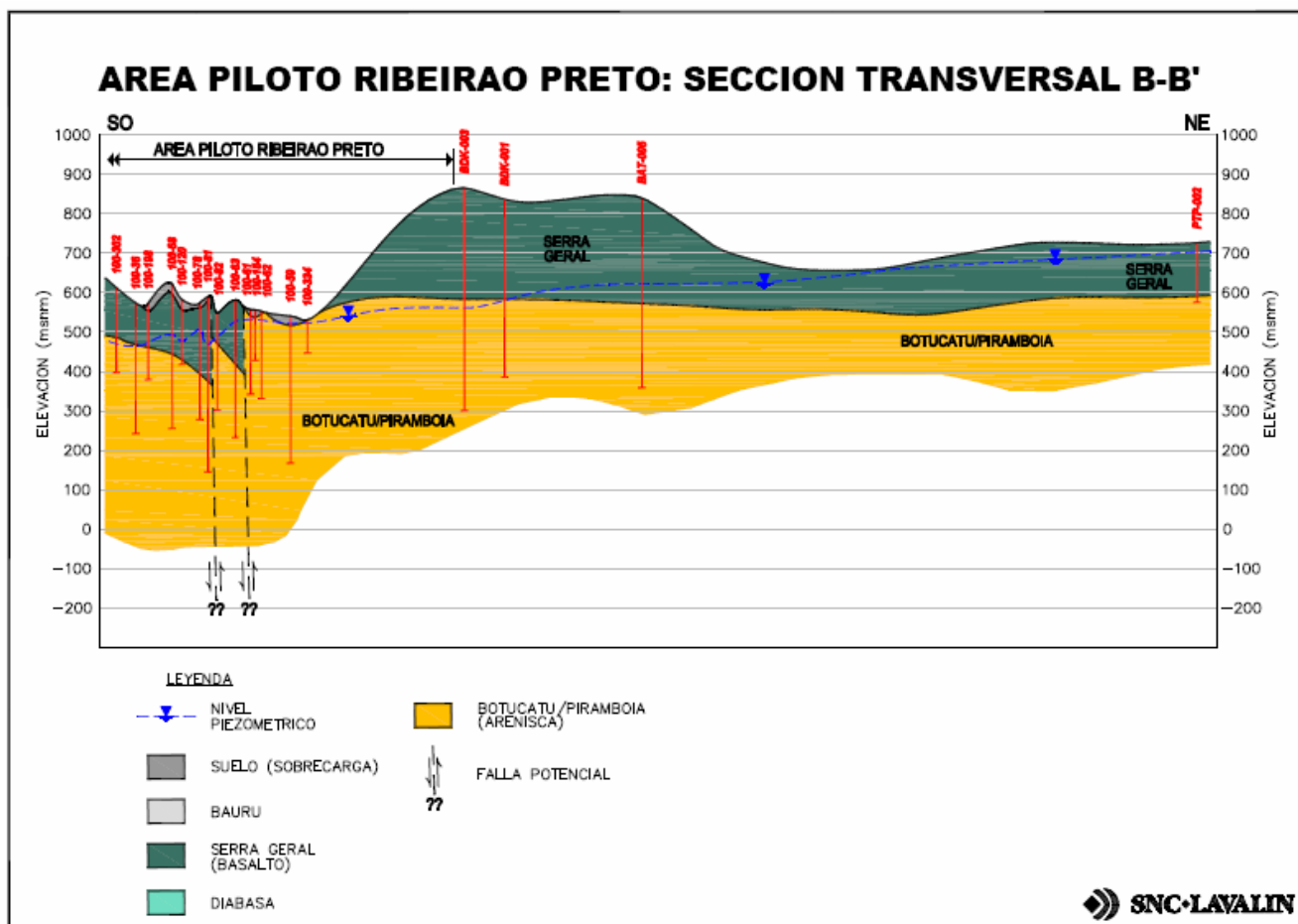


Figura 5: Sección transversal BB

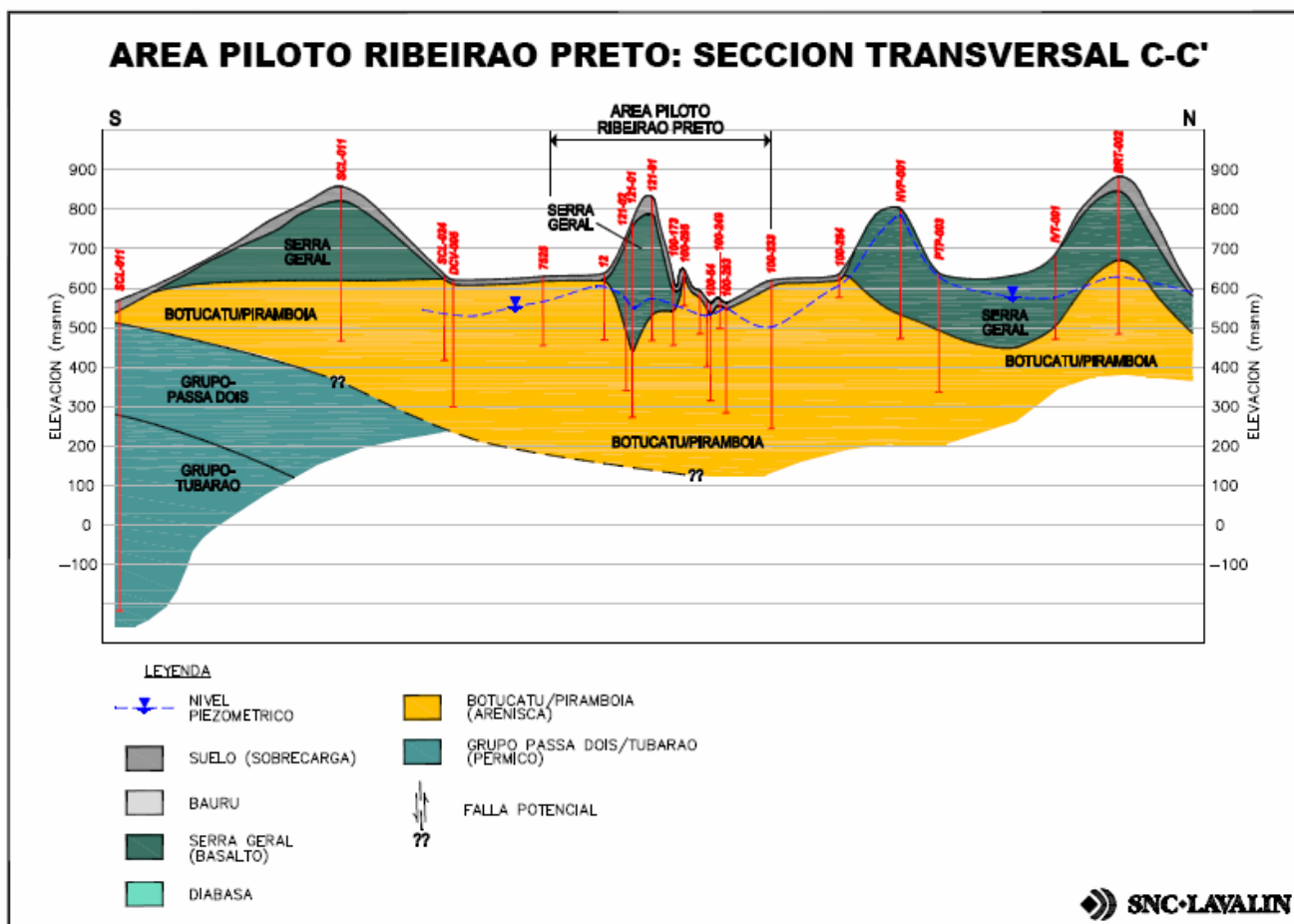


Figura 6: Sección transversal CC



El área piloto Ribeirão Preto está ubicada sobre una secuencia mesozoica de formaciones sedimentarias cubiertas por acumulaciones discontinuas de basaltos. Estos basaltos, que pertenecen a la formación volcánica Serra Geral, se extienden por todo el borde occidental del área piloto y están ausentes en el sector centro-oriental de la misma. Se considera que las rocas de Serra Geral pertenecen a la era Cretácica temprana a media. Estas se pueden correlacionar con los basaltos del Alto Paraná en Paraguay y la formación Arapey en Uruguay.

La porción superior de la Formación Serra Geral está altamente fracturada y puede actuar como un acuífero. Según Montenegro et al. (1988), el espesor promedio en el área de Ribeirão Preto es aproximadamente 65 m pero podría alcanzar a 150 m en algunas áreas.

La formación Serra Geral está compuesta por una serie de derrames basálticos, frecuentemente intercalados con las areniscas de la formación Botucatú. El espesor de estas areniscas intertrap puede variar desde unos pocos centímetros hasta más de 50 metros (IPT, 1981). En algunas áreas, especialmente en el occidente, la formación Serra Geral está cubierta por areniscas del período Cretácico superior (formaciones del Grupo Baurú) que pueden ser arcillosas con una silicificación intensa (IPT, 1993).

La porción superior de la Formación Serra Geral está muy fracturada y puede actuar como un acuífero. Según Montenegro et al. (1988), el espesor promedio en el área de Ribeirão Preto es aproximadamente 65 m y podría alcanzar 150 m en algunas áreas.

Las unidades superiores de la secuencia sedimentaria de la era Jurásica, formación Botucatú, se componen principalmente de areniscas bien clasificadas, de granulación media y fina, intercaladas localmente con depósitos más gruesos y lentes de arcilla. Se considera que esas areniscas de granos finos, bien clasificadas, normalmente rojizos y con estructuras de estratificación cruzada, son de origen eólico. Se presume que la formación Botucatú en Ribeirão Preto tiene un espesor de aproximadamente 80 a 100 metros. La formación Botucatú está relacionada con las formaciones Tacuarembó (o Rivera) de Uruguay y Misiones de Paraguay.

La formación Botucatú yace sobre la formación Piramboia, la cual probablemente pertenece a la era Triásica. Esta formación está compuesta por depósitos fluviales (areniscas finas, de facies eólicas y de interduna, intercaladas con capas de limo y arcilla) de menor permeabilidad. La formación Piramboia puede ser contemporánea con el miembro inferior de la secuencia Misiones en Paraguay y la Tacuarembó inferior o Buena Vista, en Uruguay. Esta formación ha sido descrita como areniscas finas intercaladas con capas de granos finos



y con un espesor que oscila entre 100 y 300 metros. La secuencia Botucatú / Piramboia, junto con Botucatú, normalmente tiene un espesor de cerca de 200-300 metros y en algunos pozos alcanza un espesor combinado de 400 metros o más. Los trabajos realizados por Caetano-Chang y WU (1992) y Massoli (2007) proveen un detalle de estas formaciones.

Debajo de la formación Piramboia se encuentran las areniscas, limolitas y las arcilitas del grupo Passa Dois, seguidas por el carbonífero superior de la secuencia fluvio-glacial Tubarão (Itararé). Las formaciones del grupo Passa Dois del período Pérmico-Triásico tienen permeabilidad baja y se las considera el límite impermeable de la base del acuífero (DAEE, 1974; Corrêa, 1995). La transmisividad del grupo Passa Dois es menor a  $10 \text{ m}^2/\text{d}$ .

También es importante destacar que se identificaron intrusiones máficas intercaladas entre los sedimentos. La mayoría de las intrusiones observadas son del tipo umbral ("sill"), principalmente hacia las formaciones Botucatú y Piramboia. El único afloramiento de ésta unidad corresponde a una cantera actualmente en explotación conocida como Pedreira Serrana. También, son comunes las intrusiones de morfología tipo dique, ya que pueden cruzar cualquier sedimento en la columna sedimentaria y han constituido el paso para las efusiones basálticas.

Desde el punto de vista regional, el área piloto Ribeirão Preto está ubicada en un área tectónicamente estable, con sedimentos y rocas volcánicas plegadas, los cuales presentan diferentes grados de fracturación. Ésta secuencia principalmente sedimentaria descansa sobre el basamento cristalino, del cual se heredan fracturas menores reconocidas, debido a la actividad tectónica post-volcánica del Cretácico.

### 3.3 Marco hidrogeológico

El marco hidrogeológico describe el movimiento del agua y otros fluidos dentro del marco geológico. Esto incluye la naturaleza de los acuíferos (por ejemplo, el flujo en medio poroso o en fractura); los bordes hidráulicos; los gradientes verticales e hidráulicos; las cargas hidráulicas y su variación con el tiempo; las direcciones del movimiento del agua subterránea; la ubicación de las áreas de recarga y descarga de agua subterránea; y la existencia y estabilidad de las divisorias de agua subterránea dentro del área.



### **3.3.1 Principales unidades hidroestratigráficas**

A los efectos del presente estudio de modelación se considera que el Sistema Acuífero Guaraní está constituido por las areniscas de la formación Botucatú, de la era Jurásica, y la formación Piramboia subyacente, la cual pertenece al Triásico.

Para fines del presente estudio la primera unidad significativa es el basalto de la formación Serra Geral, la cual se encuentra en la parte occidental del área piloto y pertenece a la era Cretácico, constituyendo una capa confinante de muy baja permeabilidad para el Acuífero Guaraní subyacente. La excepción a esto es donde el basalto es relativamente delgado y las fracturas penetran la unidad completamente.

Donde está presente, la base del basalto define el límite o borde superior del Acuífero Guaraní.

Junto a las unidades de areniscas del SAG, el siguiente componente significativo del marco hidrogeológico es el techo del Grupo Passa Dois. Se considera que este estrato marca el borde inferior del SAG, según se define para efectos de la modelación en el presente estudio, y el techo de la secuencia de rocas sedimentarias que son de la era Permotriásica y, por lo general, tienen baja permeabilidad.

Finalmente, las rocas Pérmicas, y en algunas áreas las rocas Carboníferas, yacen sobre el basamento cristalino precámbrico.

### **3.3.2 Componentes del Acuífero Guaraní**

Según se mencionó anteriormente, se considera que, para efectos del presente ejercicio de modelación, el Sistema Acuífero Guaraní incluye los sedimentos de las formaciones Botucatú y Piramboia, cuyas edades varían entre Triásica y Jurásica. A partir de una revisión de la bibliografía se indica que las formaciones Botucatú y Piramboia son, generalmente, las unidades más permeables y constituyen el principal componente portador de agua del SAG, debido a la naturaleza bien clasificada de las areniscas de grano medio.

### **3.3.3 Estructura geológica del área de estudio**

Luego de identificar las unidades estratigráficas presentes dentro del área piloto fue necesario determinar sus distribuciones tridimensionales en toda el área. La información





recopilada de los registros disponibles de pozos fue interpolada para desarrollar las principales superficies, las cuales son:

- Techo del basalto Serra Geral.
- Piso del basalto/techo del Acuífero Guaraní.
- Piso del Acuífero Guaraní.
- Techo del Precámbrico.

Estas cuatro superficies definieron las siguientes unidades:

- Techo de la formación Serra Geral, donde ésta existe.
- Techo de la formación Botucatú– es decir, el techo del Acuífero Guaraní.
- Techo del Pérmico – corresponde al piso del SAG.
- Techo del Precámbrico.

Desde el punto de vista del espesor de las unidades del acuífero, las superficies anteriores definen sólo el espesor total de todo el SAG, y no el espesor de las unidades individuales (Botucatú y Piramboia) que forman el acuífero. El espesor total dentro del área piloto tiene un valor promedio de 240 m, que concuerda con los 250 m que se informan en la bibliografía.

### 3.3.4 Sistema de flujo del agua subterránea

En la Figura 7 se presenta el mapa de curvas piezométricas construido con base en la información sobre los niveles de agua registrados recientemente (años 2005 y 2007). Desde el punto de vista del movimiento real de agua subterránea, es claro que la mayor parte de este movimiento tiene lugar dentro de las formaciones Botucatú/Piramboia. A escala regional, el flujo de agua subterránea parece tener dirección este-oeste. Sin embargo, debido a la sobreexplotación del acuífero en la ciudad de Ribeirão Preto durante, al menos, la última década, los niveles de agua han descendido significativamente, creando un cono de depresión dentro del área urbana de la ciudad. Basándose en una comparación entre los niveles piezométricos iniciales, medidos cuando se perforaron los pozos, y los niveles en algunos pozos inactivos en el año 2002, Guido (2004) observó una reducción en la carga de hasta 60 m en el Pozo 116, ubicado dentro de la zona noreste de la ciudad. Debido a que este es un pozo inactivo, el nivel del agua registrado recientemente allí es un nivel cuasi



estático, que representa los efectos de la sobreexplotación del agua subterránea a lo largo de los años. Como resultado de esto, el agua subterránea fluye ahora hacia el centro de la ciudad.

Al este del área piloto, donde aflora el acuífero, el agua subterránea fluye desde las crestas altas hacia los ríos y corrientes, donde posteriormente se descarga.

### 3.3.5 Recarga

En el área piloto Ribeirão Preto, el acuífero SAG se reabastece mediante la recarga directa de los afloramientos de arenisca tanto en las áreas urbanas como en las rurales, y a través de los basaltos fracturados. También se ha conceptualizado que puede haber cantidades pequeñas de agua subterránea de las unidades Pérmicas y Carboníferas subyacentes que están recargando las formaciones de arenisca Botucatú y Piramboia (Kulls, 2003 en SMA, 2004).

Pompêo (1990) reportó valores de recarga en el rango entre 133 y 243 mm/año para el área de afloramiento de arenisca dentro de la cuenca hidrográfica del río Onça. Una simulación de recarga realizada por Aqua Bavaria Guarani (2005) sugiere un valor promedio de recarga de 132 mm/año pero que podría llegar a ser de hasta 250 mm/año. El estudio también sugiere que la recarga a través del basalto está en el rango de 50 a 100 mm/año. Cavicchia (2007) reportó tasas de recarga de aproximadamente 400 mm/año en las áreas de afloramientos de areniscas y de 20 mm/año para las áreas donde el acuífero está confinado por los basaltos suprayacentes.

Un estudio reciente de modelación del agua subterránea realizado por Wendland y Rabelo (2007) para las áreas de afloramientos del acuífero dentro de la cuenca hidrográfica de Ribeirão de Onça, concluyó que la recarga a través de las areniscas Botucatú/Piramboia es de cerca de 465 mm/año, mientras que los valores de recarga para el basalto de Serra Geral y los intertraps de arenisca/basalto son de 215 mm/año y 530 mm/año, respectivamente.

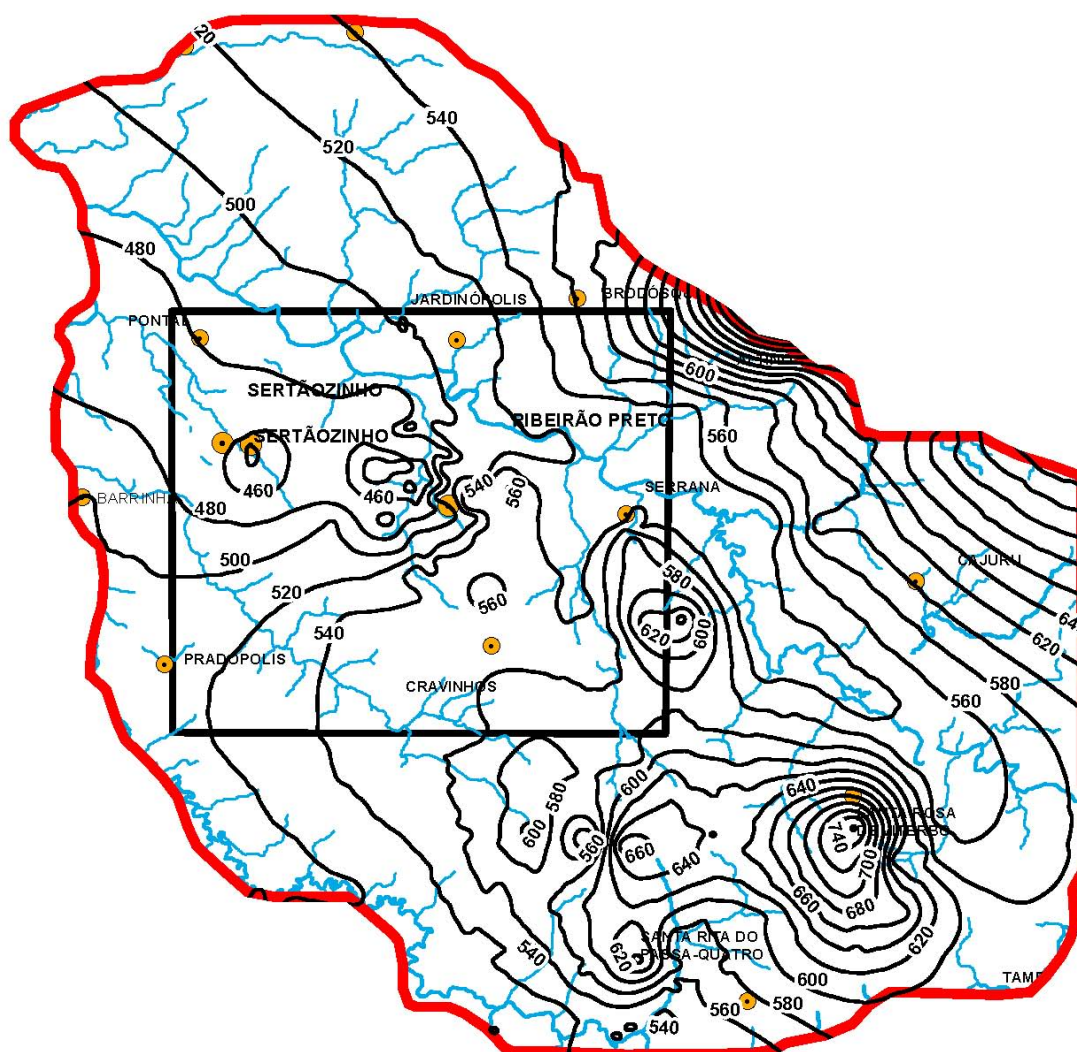


Figura 7: Curvas Piezométricas de las Areniscas Botucatú/Piramboia



**SNC-LAVALIN**  
International



### **3.3.6 Descarga**

En el área piloto el agua subterránea descarga naturalmente a cursos de agua y también es extraída en pozos de bombeo.

#### **Descarga a corrientes de agua**

Al este del área piloto hay muchos ríos, arroyos y cursos de agua que están conectados a los afloramientos de arenisca. Esos cuerpos de agua sirven como áreas de descarga del agua subterránea. No hay disponibilidad de información que pueda proporcionar un estimativo del flujo base en esos cursos de agua.

#### **Extracción en los pozos**

La mayor parte del agua subterránea extraída del SAG se utiliza para el suministro de agua en las áreas urbanas. Los principales centros urbanos que reciben suministro de agua subterránea del SAG son: Ribeirão Preto y sus áreas suburbanas circundantes; Sertãozinho, Serrana, Jardinópolis, Cravinhos y Altinópolis.

De acuerdo con la información de SIDAS/DAEE y DAERP en la década de 1991-2000 se perforaron 72 pozos de gran capacidad en Ribeirão Preto, de los cuales 36 pertenecen a DAERP, la empresa pública de agua. En la actualidad DAERP usa, solo en la ciudad de Ribeirão Preto, 95 pozos para el suministro de agua. Además del suministro de agua a las zonas urbanas, se realizan extracciones de agua para las actividades industriales y agrícolas, particularmente para la producción de la caña de azúcar y alcohol (existen 21 fábricas que producen azúcar y alcohol). Existen otros usos agrícolas y rurales menos importantes, tales como cultivos de naranjas, maní y porotos de soja, cría de ganado y uso doméstico rural. La Tabla 2 resume la distribución de la extracción de agua subterránea para la ciudad de Ribeirão Preto y las ciudades circundantes.



**Tabla 2: Extracción de agua**

Ciudad/Municipio	Ciudad	Población <sup>2</sup>	Consumo (m <sup>3</sup> /d)	Otros usos <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /d)	Extracción total <sup>4</sup> (m <sup>3</sup> /d)
Ribeirão Preto	Ribeirão Preto	551.300	348.000	16.000	364.000
Ciudades circundantes	Serra Azul	8.200	67.200	80.000	147.200
	Serrana	38.500			
	Cravinhos <sup>1</sup>	32.100			
	Jardinópolis	34.900			
	Sertãozinho	104.600			
	São Simão	14.700			
	Dumont	7.100			
<b>Total</b>		<b>791.400</b>	<b>415.200</b>	<b>96.000</b>	<b>511.200</b>

Notas:

<sup>1</sup> El agua subterránea se suministra solo al 50% de la población

<sup>2</sup> Estimación a partir de Contagem de Población 2005 (IBGE)

<sup>3</sup> Incluye usos industriales como caña de azúcar, leche, farmacéuticas, alimentos y otros usos privados

<sup>4</sup> Comunicación de geólogo de DAERP, 2008.

### 3.3.7 Propiedades hidráulicas

Las propiedades hidráulicas incluyen la transmisividad, la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y la porosidad eficaz. Además, en el dominio del modelo es necesario tener en cuenta la heterogeneidad y la anisotropía de los acuíferos. Las Tablas 3 y 4 presentan un resumen de las propiedades hidráulicas del basalto Serra Geral y las areniscas del SAG, según se informa en la literatura.

**Tabla 3: Propiedades hidráulicas del basalto Serra Geral**

Fuente	Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)	Porosidad eficaz (%)
DAEE (1974)	1 - 95	
Montenegro et al (1988)	0,04 – 1,6	
IPT (2000)	1 - 95	1 - 5



**Tabla 4: Propiedades hidráulicas de las areniscas del SAG**

Fuente	Conductividad hidráulica (m/s)	Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)	Coefficiente de almacenamiento (S)	Porosidad eficaz (%)
Guido (2004)	$1,0 \times 10^{-5} - 4,0 \times 10^{-5}$	170 - 220	$1,0 \times 10^{-4} - 5,0 \times 10^{-4}$	10 - 20
Borghetti et al (2004)	$3,5 \times 10^{-5}$	150 - 800	$1,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-4}$	15 - 20
DAEE/IG/CPRM (2005)	$3,5 \times 10^{-5}$	260	$1 \times 10^{-3}$	17
Montenegro et al (1990)	$4 \times 10^{-5}$	280 - 1000	$1,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-4}$	10
RABELO (2005)	$2,8 \times 10^{-5}$	9 - 1200	$10^{-5} - 10^{-3}$	15 - 25
DAEE (1974)	$4 \times 10^{-5}$	200 - 540	$10^{-5} - 10^{-3}$	25
Sacks (1997)	$2 \times 10^{-5}$	299		
Sinelli et al (1980)	$4 \times 10^{-5}$	280 - 1000		13-15
Teissedre et al (1982)			$10^{-6} - 10^{-4}$	10
IPT (2000)	$1,0 \times 10^{-6} - 4,5 \times 10^{-5}$	40 - 500	$1,0 \times 10^{-5} - 1,0 \times 10^{-3}$	25
Cavicchia (2007)	$3 \times 10^{-5}$			

Como parte del presente estudio desarrollado por SNC-Lavalin, se llevaron a cabo 11 ensayos hidráulicos. Los detalles de los ensayos y los resultados correspondientes se pueden encontrar en el informe “*Análisis de ensayos hidráulicos en áreas piloto. Informe Final*” (SNC-Lavalin, 2008). El análisis de estos ensayos sugiere que los valores representativos de transmisividad generalmente varían entre 80 y 656 m<sup>2</sup>/día, con un solo valor atípico elevado de 1610 m<sup>2</sup>/día. El coeficiente de almacenamiento varía entre  $7,9 \times 10^{-2}$  y  $1,3 \times 10^{-5}$ .

Según ITP (2000), la Formación del Grupo Passa Dois tiene una transmisividad menor a 10 m<sup>2</sup>/d, mientras que las Formaciones del Grupo Tubarão tienen una transmisividad que oscila entre 0,3 y 200 m<sup>2</sup>/d, con una porosidad eficaz de 5 %.



## **4.0 EL MODELO NUMÉRICO**

### **4.1 El código de modelación**

Se utilizó MODFLOW 2000 (Harbaugh et al., 2000) como el código numérico de simulación para el estudio. La experiencia en la modelación de lugares complejos sugiere que los modelos MODFLOW diseñados apropiadamente son adecuados para simular el flujo de agua subterránea en escenarios complejos. MODFLOW es capaz de simular flujos tridimensionales de agua subterránea en régimen permanente y transitorio en una variedad de escenarios que van del más simple al más complejo. Su flexibilidad permite acomodar áreas de hidroestratigrafía variable en tres dimensiones y patrones complejos de flujo en las cercanías de las corrientes de agua y de los pozos de suministro de agua, así como también las propiedades heterogéneas de los materiales. MODFLOW cuenta con muchas opciones para representar las fuentes y sumideros. Estas opciones ofrecen la flexibilidad suficiente para representar las características importantes de las áreas de estudio.

MODFLOW se basa en una formulación de diferencias finitas centrada en bloque. Ya que ésta formulación se desarrolló a partir de un registro local del balance hídrico, los modelos convergentes MODFLOW son de conservación de masa a escala local y global. MODFLOW también admite un esquema simple de interpolación de velocidad para los cálculos de rastreo de partículas. El código MODPATH de rastreo de partículas le da al MODFLOW la capacidad de desarrollar líneas de trayectoria y análisis de tiempos de recorrido precisos. El programa de utilidad ZoneBudget (Harbaugh, 1990) es una calculadora de balance hídrico.

Se seleccionó el programa Visual MODFLOW 4.2 Pro, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc. (WHI, 2003), como la interfaz gráfica de usuario para este estudio porque permite el ingreso fácil de información, y genera resultados rápidamente. La cuadrícula del modelo, el ingreso de la información, y los resultados se pueden visualizar en una vista en planta y en una sección transversal en cualquier momento durante el desarrollo de los modelos.

MODFLOW es un modelo de diferencias finitas centrada en bloque que tiene una entrada modular con paquetes o subrutinas separadas para manejar ríos, drenajes, evapotranspiración, recarga y pozos. Un programa o código de computación resuelve una serie de ecuaciones algebraicas generadas por aproximación de las ecuaciones diferenciales parciales (ecuaciones reguladoras, condiciones de borde y condiciones iniciales) que conforman el modelo matemático. Técnicas de aproximación tales como las de diferencias finitas o los métodos de elementos finitos operan en el modelo matemático y lo cambian a





una forma que puede ser resuelta rápidamente por la computadora. El conjunto de ecuaciones algebraicas, representado como una ecuación matriz, se resuelve por medio de métodos numéricos.

## **4.2 Dominio del Modelo y condiciones de borde**

El primer paso en el ejercicio de modelación es determinar la extensión del dominio del modelo dándole énfasis a la selección de los bordes apropiados para el mismo. La extensión del modelo es, por lo general, más grande que el área primaria de estudio para poder manejar el tema de las condiciones de borde.

La selección de las condiciones de borde apropiadas es fundamental para el desarrollo de un modelo exacto y, donde sea posible, es preferible utilizar las características físicas naturales. Los bordes hidrológicos naturales que limitan el sistema de flujo incluyen las divisorias geológicas, de aguas superficiales o de agua subterránea. En la Figura 8 se observa el dominio del modelo.

Además de los bordes laterales, fue necesario definir los bordes superiores e inferiores del modelo. Como ocurre generalmente, se seleccionó la superficie del terreno como el borde superior del modelo y el borde inferior más apropiado pareció ser el techo del Pérmico. Este marca el límite inferior de la sucesión sedimentaria permeable y el límite superior de los depósitos Pérmicos subyacentes, que se cree son relativamente impermeables en comparación con el Acuífero Guaraní.

## **4.3 La cuadrícula del Modelo**

El enfoque de diferencias finitas utilizado en MODFLOW comprende la definición del área a ser modelada como una serie de celdas que se alinean en filas, columnas y capas. A este proceso se lo denomina discretización del área del modelo y luego el enfoque de diferencias finitas simula las cargas hidráulicas en cada celda de manera que el volumen de agua que entre y salga de esa celda sea igual. El arreglo de celdas constituye la cuadrícula del modelo.



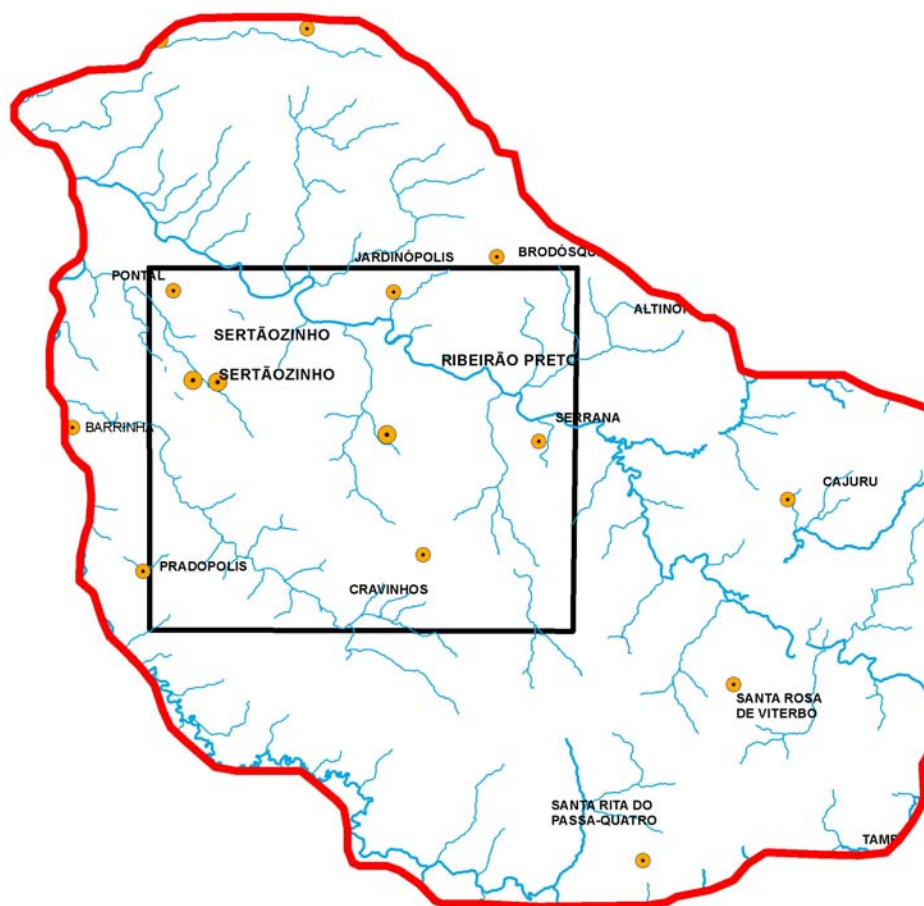


Figura 8: Dominio del Modelo



El modelo se compone de una cuadrícula de nodos, ya sean cuadrados o rectangulares. Al añadir capas en sentido vertical, esos nodos se convierten en sólidos tridimensionales en forma de cubos o rectángulos. La cuadrícula horizontal debe ser la misma para cada capa. La selección del espaciamiento nodal es fundamental, pero en el Visual MODFLOW ese espaciamiento se puede ajustar durante el proceso de modelación. En sentido horizontal, se pueden añadir filas y columnas adicionales en áreas donde las elevaciones de la capa cambian rápidamente o las pendientes de la superficie piezométrica son pronunciadas. Sin embargo, como la modelación puede requerir recursos informáticos significativos, el diseño de la cuadrícula debe realizarse cuidadosamente, limitando la resolución espacial más alta al área de interés específico.

Un cambio en la carga en dirección vertical afectará la selección del espaciamiento nodal vertical. Un factor secundario a tener en cuenta al seleccionar el espaciamiento nodal es la variabilidad de las propiedades del acuífero. Las capas del modelo generalmente corresponden a las unidades hidroestratigráficas.

Como la modelación puede requerir recursos informáticos significativos de la memoria utilizada y del tiempo de ejecución para la convergencia del modelo, el diseño de la cuadrícula debe realizarse cuidadosamente limitando el área de mayor resolución espacial al área de interés inmediato. Al diseñar un modelo cuidadosamente, éste puede permanecer a nivel regional mientras que conserve una resolución espacial que sea adecuada para tratar los objetivos de estudio. La ubicación del área detallada del modelo se debe guiar por un reconocimiento de la ubicación de los esfuerzos críticos y de los asuntos que debe tratar el modelo a ser desarrollado.

Como se mencionó anteriormente, el enfoque de diferencias finitas utilizado en MODFLOW comprende la definición del área a ser modelada como una serie de celdas que se alinean en filas, columnas y capas y que el arreglo de celdas constituye la cuadrícula del modelo. Los nodos creados por esta cuadrícula bidimensional pueden ser cuadrados o rectangulares.

La cuadrícula utilizada inicialmente en el modelo fue de 131 filas por 139 columnas, con un espaciamiento variando entre 1200 m, por fuera del área piloto, y 600 m dentro del área piloto, para un total de 18.209 celdas por capa. Las celdas que se encuentran fuera del dominio del modelo se denominaron inactivas. En la Figura 9 se muestra el sistema de cuadrícula.



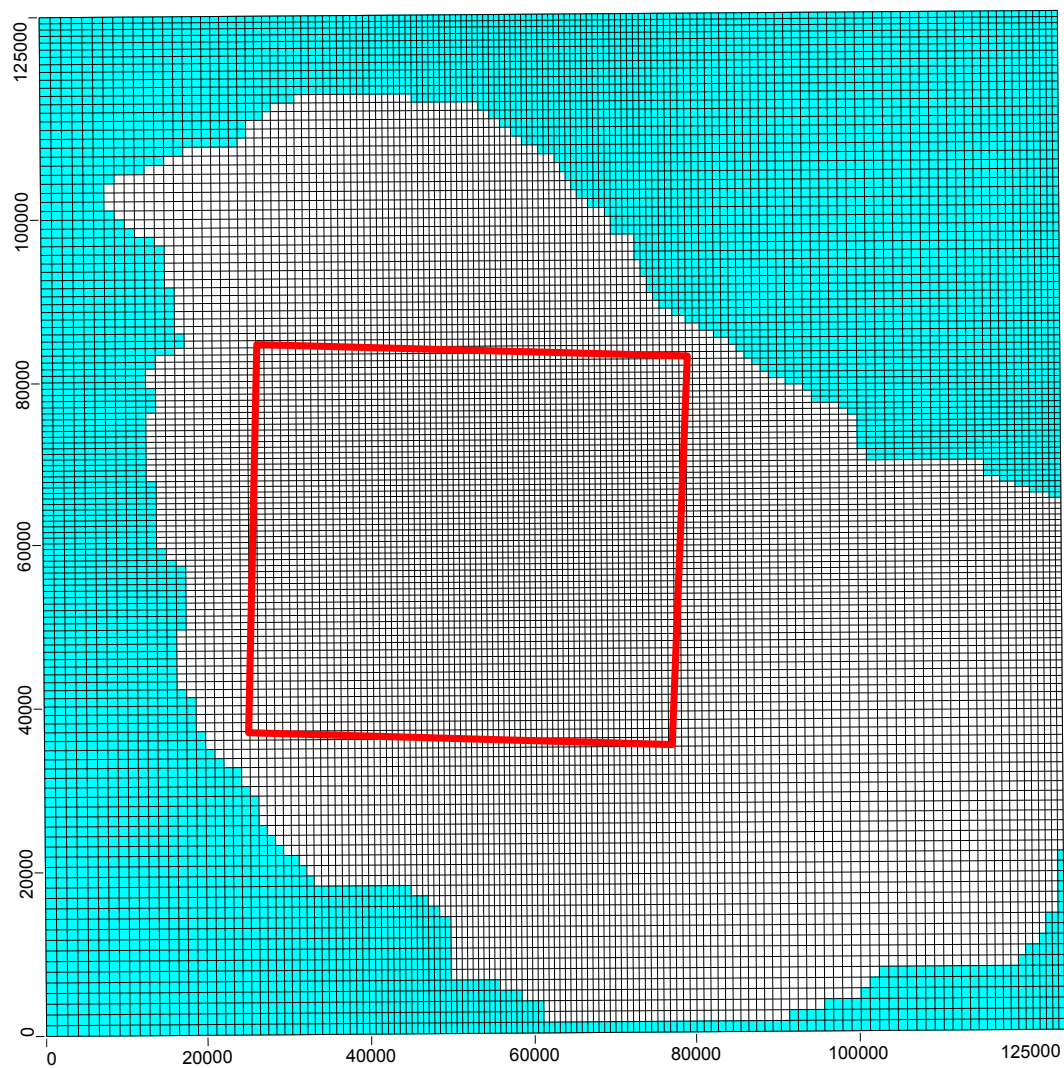
#### 4.4 Las capas del Modelo

Luego de añadir capas en el sentido vertical los nodos bidimensionales definidos por la cuadrícula se convierten en cubos o bloques tridimensionales. La cuadrícula horizontal debe ser la misma para cada capa. Por lo general, la selección de las capas del modelo corresponde a las unidades hidroestratigráficas aunque, hasta en casos simples, se ha demostrado que al subdividir una unidad sencilla del acuífero en diferentes capas idénticas se puede obtener una simulación mejorada del movimiento vertical y facilitar la convergencia del modelo.

El modelo se dividió inicialmente en 2 capas:

- Capa 1 del Modelo: Basalto.
- Capa 2 del Modelo: Areniscas Botucatú/Piramboia.

No se incluyó la capa de cuaternario reciente debido a que es muy delgada comparada con las otras dos capas. Donde el basalto está ausente, a la Capa 1 del modelo se le asignó un espesor mínimo de 10 m, y se le asignaron las propiedades de la arenisca. Dónde el Basalto está presente, se asumió que los 65 m superiores están muy fracturados. Por lo tanto en las áreas dónde los espesores de Basalto son inferiores a 65m, éste no proveerá confinamiento a las areniscas Botucatú/Piramboia, sino que actuará como un acuífero superior con una alta conductividad hidráulica vertical. Durante el ejercicio de calibración, la capa de arenisca fue subdividida adicionalmente en dos sub-capas 2a y 2b que representan las formaciones Botucatú y Piramboia respectivamente.



**Figura 9: Cuadrícula del Modelo**



**SNC•LAVALIN  
International**



## 4.5 Condiciones de borde

Las condiciones de borde definen cómo se relaciona el modelo con el ambiente que lo rodea, tanto lateral como verticalmente, es decir, cómo interactúa el modelo con el área más allá del dominio del modelo. Los bordes físicos de los sistemas de flujo de agua subterránea se componen por formaciones relativamente impermeables, ya sean formaciones en roca o ricas en arcilla, o cuerpos de aguas superficiales. Otros bordes tales como divisorias de aguas subterráneas y cursos de agua se forman como resultado de condiciones hidrogeológicas. Las divisorias de agua subterránea forman bordes hidráulicos cuyas ubicaciones están influenciadas por la presencia de características físicas. Las divisorias de cursos de agua naturales separan los sistemas de flujo someros de los sistemas de flujo profundos. Todos los bordes hidráulicos son características transitorias que pueden cambiar de ubicación o desaparecer, si cambian los esfuerzos del sistema.

Los bordes hidrogeológicos se clasifican en tres tipos:

- Tipo 1 - Carga especificada - (condiciones Dirichlet) – se especifica la carga.
- Tipo 2- Bordes de flujo especificados (condiciones Neumann) – se especifica el flujo a través de un borde, inclusive un borde sin flujo (flujo cero).
- Tipo 3- Borde de flujo dependiente de carga (condiciones Cauchy o de bordes mezclados) – para los cuales se calcula el flujo a través del borde dada una condición de carga de borde. Esta condición de borde relaciona las cargas en el borde con los flujos en el borde.

En MODFLOW, todas las opciones para simular las condiciones de borde también se pueden utilizar en el interior del dominio del modelo para simular fuentes y sumideros de agua o bordes internos. Las condiciones dependientes de la carga se pueden utilizar para simular ríos, lagos y drenajes en el interior de la cuadrícula. La diferencia entre las condiciones de borde dependiente de la carga y las condiciones internas dependientes de la carga generalmente se tornan borrosas porque las mismas opciones del modelo se utilizan para representar a ambas. Aquí se analizan las condiciones de borde y las fuentes y sumideros internos.

Idealmente, un modelo numérico de flujo de agua subterránea se debería extender hasta los bordes hidrogeológicos naturales, tales como las divisorias de agua subterránea. En algunos casos, estos bordes naturales se encuentran tan alejados del área de interés que no resulta práctico extender el modelo sobre un dominio tan extenso. En otros casos no se conoce con exactitud la cobertura de la influencia de los pozos de bombeo a ser simulados, por lo que se



puede tener que sobreestimar el dominio del modelo al principio para acomodar estas zonas. No es necesario extender el modelo hasta bordes remotos siempre y cuando el modelo sea lo suficientemente amplio para que los efectos de los esfuerzos (descarga de pozos) en el área de interés no se propaguen hasta el perímetro del modelo. Si los esfuerzos afectan las condiciones a lo largo del perímetro del modelo, es decir conos de abatimiento de los pozos o líneas de flujo de zonas de captura que se extienden hasta los bordes del modelo, los resultados probablemente se verán afectados artificialmente por estas condiciones de borde y el truncamiento del modelo.

Las Figura 10a y 10b ilustran la extensión del dominio del modelo en relación al área piloto y las condiciones de borde aplicadas para simular el movimiento de agua subterránea. Se asignaron dos tipos de condiciones de borde alrededor del perímetro del modelo: condiciones sin flujo y condiciones de carga especificada.

Se asignó la condición de borde sin flujo a lo largo de los bordes este y norte del modelo y este marcó la divisoria inferida de agua subterránea. La divisoria se infirió a partir de las elevaciones de la superficie del terreno. También se asignó un borde sin flujo al borde inferior, que representa el piso del Pérmico.

En los bordes oeste y sur, el límite del modelo es el río Mogui-Guaçu. A los bloques de la cuadrícula en el Capa 1 (Basalto), que corresponden a la ubicación del río, se les asignaron los niveles promedio del río. Este borde fue modelado usando el paquete MODFLOW River.

Como lo muestra la Figura 10b, también se asigna una condición de borde con carga especificada a lo largo de los bordes oeste y sur para las capas de areniscas. A lo largo de este borde, los niveles de agua en la Arenisca (capas 2a y 2b) son especificados basándose en la interpolación de niveles de agua observados que fueron presentados en la Figura 7.

Los numerosos afluentes de los ríos Pardo y Mogui-Guaçu, que fluyen dentro y a lo largo de una porción de los límites del modelo en el sureste, fueron representados como bordes de control de carga utilizando el paquete de drenaje de MODFLOW (*Drain package*).

#### 4.6 Fuentes y sumideros

Las fuentes y sumideros de agua que se incorporaron en el modelo de flujo de agua subterránea de Ribeirão Preto son:

- Principales tributarios de los ríos Pardo y Mogui-Guaçu.
- Recarga.
- Pozos.

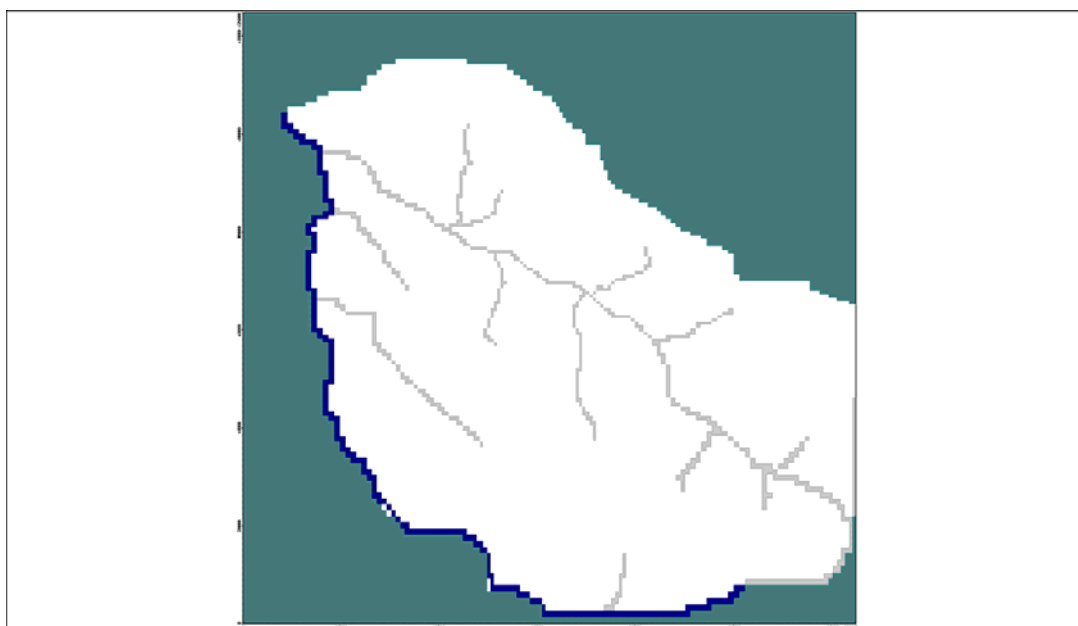


Figure 10a - Límites de la Capa 1

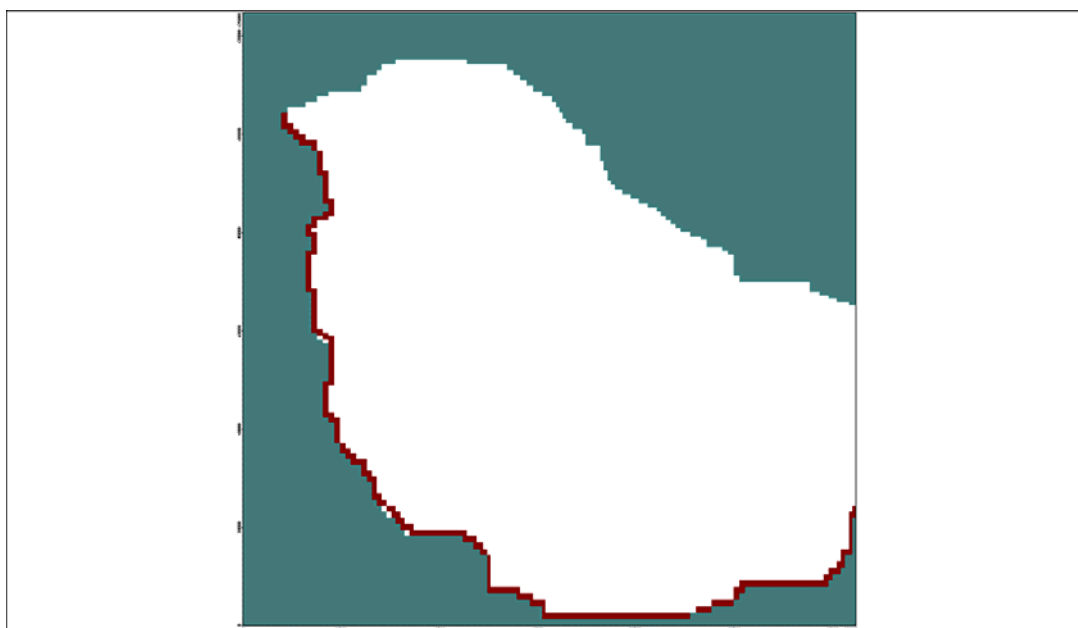


Figure 10b - Límites de las Sub-Capas 2a y 2b

Figura 10: Límites del modelo





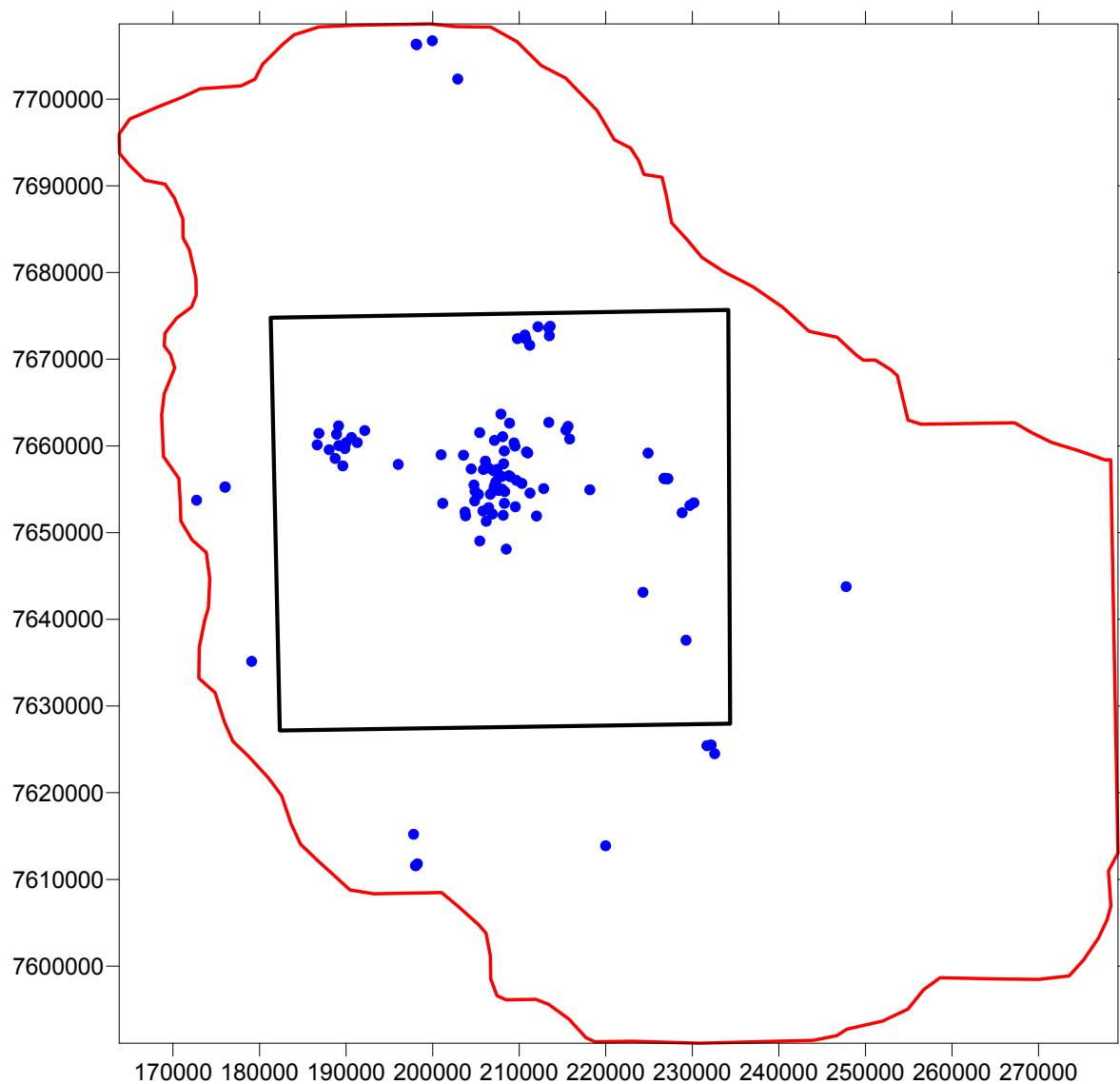
Los tributarios de los ríos Pardo y Mogui-Guaçu que se presentan en la Figura 10 se simularon con el Paquete de Drenaje MODFLOW. El Paquete de Drenaje en el MODFLOW se diseñó para simular los efectos de las características hidrológicas que remueven agua del acuífero a una tasa proporcional a la diferencia de carga entre los niveles de agua subterránea y los niveles del drenaje. En el modelo se especifican el nivel y la conductancia del drenaje. Con el Paquete de Drenaje, el agua subterránea solo puede fluir hacia el drenaje cuando el nivel del agua subterránea es mayor al nivel del drenaje. Cuando el nivel del agua subterránea es menor o igual al nivel del drenaje, éste no descarga agua desde el modelo ni recarga agua hacia el modelo nuevamente. Para este estudio, los niveles del drenaje se establecieron como los niveles promedio de agua inferidos en estas características. Las conductancias de los drenajes están relacionadas con la conductividad hidráulica de las formaciones en las que se encuentran.

La recarga se aplicó directamente como una fuente hacia el nivel freático, y se simuló con el Paquete de Recarga MODFLOW (*Recharge Package*). Inicialmente se asignó la recarga para tres zonas en el área del modelo y luego se modificó durante el proceso de calibración. Estas zonas son el área donde el basalto está presente y las áreas donde aflora la Arenisca y el Pérmico.

En la Figura 11 se presenta la ubicación de los pozos de suministro de agua en el área del modelo. Los pozos se simularon con el Paquete de Pozo MODFLOW (*Well Package*). Todos los pozos tienen filtros en las areniscas Botucatú y Piramboia. Para los pozos a los cuales no se registró el acuífero fuente, se supuso que los pozos están abiertos en la arenisca. Para los pozos se reportó un solo valor de caudal de bombeo. Aunque para algunos pozos estaba claramente especificado, hay muchos pozos para los cuales no hay información disponible para confirmar que los caudales registrados sean promedios representativos, o aún siquiera si los pozos se encuentran activos. Para este análisis se supuso que los caudales reportados representan valores promedio a largo plazo.

Se desarrollaron simulaciones para todos los pozos de bombeo con el fin de modelar el abatimiento significativo observado dentro de la ciudad de Ribeirão Preto.





**Figura 11: Ubicación de pozos de extracción**



## 5.0 CALIBRACIÓN DEL MODELO

### 5.1 Enfoque de la calibración

El análisis se desarrolló para representar las condiciones a largo plazo en el sistema de agua subterránea. Por esto, para la calibración se seleccionó una solución de flujo de agua subterránea en régimen permanente. El modelo en régimen permanente se ejecutó con los pozos en operación. La calibración de un modelo de flujo se refiere a demostrar que el modelo es capaz de producir elevaciones de niveles de agua medidos en campo y flujos dentro de un rango de error pre-establecido. Esto se hace en el MODFLOW al comparar un conjunto de información representativa de las elevaciones del nivel de agua con las cargas generadas por el modelo, y al comparar los flujos en el balance hídrico con los flujos medidos, si se encuentran disponibles.

En el Visual MODFLOW se ingresa un valor del punto de observación y la elevación del nivel de agua para cada pozo y, en la salida se muestran los resultados en forma del valor calculado y el valor observado. Ya que este es un modelo en régimen permanente, se debe utilizar un nivel de agua promedio.

La calibración se llevó a cabo posteriormente por el procedimiento de prueba y error. Esto se hizo en una manera sistemática tal que se pudiera evaluar la sensibilidad de cada parámetro. En la calibración por prueba y error, inicialmente se asignan valores de parámetro a cada nodo en la cuadrícula. Durante la calibración, los valores del parámetro se ajustan en ejecuciones secuenciales del modelo para que las cargas simuladas y los flujos coincidan con los objetivos de la calibración. El algoritmo utilizado para resolver la matriz es el *WHS solver*, con los parámetros presentados en la Tabla 5.

**Tabla 5: Parámetros utilizados con *WHS solver***

<b>Parámetro</b>	<b>Criterios</b>
Nivel de factorización	0
Iteración exterior máxima	1000
Iteración interior máxima	250
Factor de amortiguamiento	1
Criterio de cambio en carga	0,01
Criterio de cambio residual	0,01
Criterio residual relativo	0



Durante el proceso de calibración, todos los parámetros se pueden ajustar dentro de los rangos confiables establecidos, con base en la información disponible. Los resultados de cada ejecución del modelo se comparan con los objetivos de calibración, se realizan ajustes de los parámetros seleccionados y luego se inicia otra calibración de prueba.

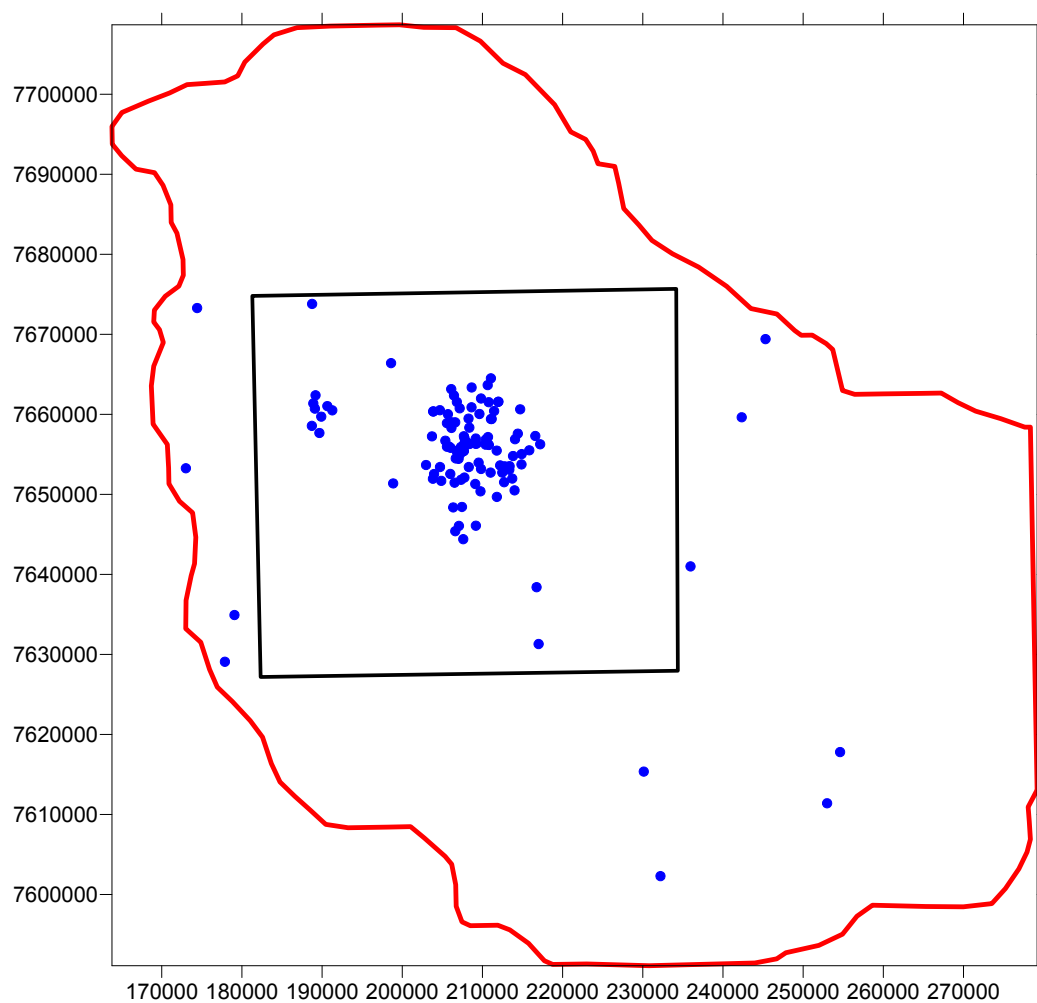
Los objetivos de calibración del modelo son niveles de agua subterránea en pozos de monitoreo y de suministro de agua en el área de estudio. En la Figura 12 se presenta la ubicación de los pozos de calibración. Las ubicaciones corresponden a un pozo abierto a través del basalto o la arenisca, para el cual se conoce el nivel de agua. Durante la calibración se le asignó una ponderación más alta a la información del nivel de agua en los pozos ubicados dentro del área piloto Ribeirão Preto.

La coincidencia entre el modelo y las observaciones se evaluó utilizando medidas cuantitativas y cualitativas (ASTM, 1993). La evaluación cuantitativa consiste en la comparación estadística entre los niveles de agua observados y calculados. Las estadísticas se calcularon sobre los residuales calibrados de los objetivos, donde un residual se define como la diferencia entre los niveles de agua calculados y calibrados en un punto específico de observación. Las estadísticas típicas incluyen la media del residual y la raíz cuadrada media de la media residual.

La evaluación cualitativa consiste en la comparación visual de los sentidos de flujo de agua subterránea deducidos del mapeo de los niveles de agua. La evaluación cualitativa también incluye la revisión del balance de flujo calculado para asegurarse que esté dentro de los límites físicamente reales y que sea consistente con el modelo conceptual. La evaluación cualitativa también incluye la preparación de diagramas de dispersión de niveles de agua calculados versus observados. Los diagramas de dispersión son un método estándar para proporcionar una impresión visual de la calidad del ajuste del modelo numérico de flujo de agua subterránea.

## 5.2 Valores iniciales

Los parámetros iniciales fueron estimados con base en la información publicada que se resumió anteriormente en la sección 3.3.2. En la Tabla 6 se resumen los valores iniciales de conductividad hidráulica y en la Tabla 7 se presentan las tasas iniciales de recarga.



**Figura 12: Ubicación de pozos de Calibración**



**SNC•LAVALIN  
International**



**Tabla 6: Conductividades hidráulicas iniciales estimadas**

Formación	$k_x$ (m/d)	$k_y$ (m/d)	$k_z$ (m/d)
Basalto	0,08	0,08	0,008
Arenisca	3	3	0,3

**Tabla 7: Tasas de recarga iniciales**

Área	Tasa de recarga (mm/año)
Afloramientos de arenisca	250
Basalto	50

### 5.3 Resultados de la calibración

En total se utilizaron 116 pozos para la calibración del modelo. En la Tabla 8 se presentan los resultados detallados obtenidos con el modelo calibrado de flujo de agua subterránea cuando los pozos están bombeando. La Tabla incluye un cálculo de la diferencia entre los niveles de agua calculados y observados. Estas diferencias, denominadas residuales, se calculan así:

$$R = h_{CALC} - h_{OBS}$$

Donde,  $R$  es el residual, y  $h_{CALC}$  y  $h_{OBS}$  son los niveles de agua calculados y observados, respectivamente. Los residuales positivos indican sitios donde los niveles de agua calculados son más altos que los niveles observados, mientras que los residuales negativos indican los lugares donde los niveles de agua calculados son inferiores a los niveles observados.



**Tabla 8: Comparación de niveles de agua observados y calculados**

Pozo	Coordenadas		Carga observada $h_{OBS}$ (msnm)	Carga calculada $h_{CALC}$ (msnm)	Residual, R (m)
	Este	Norte			
12	217001	7631300	575.5	627.6	52.1
130	242331	7659630	579.0	622.9	43.9
131	245300	7669400	660.0	665.8	5.8
373	188750	7673799	491.7	492.2	0.5
379	177873	7629086	517.8	510.2	-7.7
381	179071	7634926	509.7	512.8	3.1
397	206450	7662351	515.0	485.4	-29.6
401	210690	7657160	516.0	482.9	-33.1
405	211990	7661581	507.0	512.9	5.9
417	213380	7653529	560.0	522.7	-37.3
424	205570	7658900	465.0	460.4	-4.6
429	214410	7657589	500.0	524.8	24.8
431	212650	7653201	530.0	516.8	-13.2
436	211450	7660410	518.0	502.8	-15.2
438	210650	7663650	486.9	511.8	24.9
440	212770	7653510	555.5	516.5	-39.0
448	213350	7653080	550.2	524.4	-25.8
453	211050	7664500	504.0	516.5	12.5
460	207750	7652101	475.1	474.7	-0.4
461	198860	7651370	501.2	488.0	-13.2
462	206790	7655380	427.7	446.8	19.1
464	207680	7657270	445.5	451.9	6.4
468	209821	7661980	508.2	498.6	-9.5
469	209750	7650380	505.2	507.1	1.9
474	203820	7651950	454.0	473.3	19.3
482	214060	7656890	514.0	522.2	8.2
483	214000	7650500	539.8	541.7	1.9
501	206100	7663150	464.0	490.3	26.3
504	209101	7651300	527.0	494.5	-32.5
511	206801	7661550	490.2	480.5	-9.7
513	208030	7656520	455.8	450.7	-5.1
518	203700	7657251	415.4	459.1	43.7
521	207600	7644400	553.0	536.5	-16.5
525	206230	7658980	447.1	461.4	14.3
528	206230	7658940	460.0	461.1	1.1
529	207680	7655410	454.0	446.6	-7.4
531	206600	7659000	482.0	462.2	-19.8
532	202961	7653670	465.1	468.2	3.0
533	204859	7651690	453.0	474.2	21.2
538	207440	7648430	512.0	508.7	-3.3
552	209150	7656319	463.9	458.8	-5.1
556	211060	7659410	467.7	490.0	22.3



Pozo	Coordenadas		Carga observada $h_{OBS}$ (msnm)	Carga calculada $h_{CALC}$ (msnm)	Residual, R (m)
	Este	Norte			
558	211150	7659420	480.1	491.0	10.9
561	207799	7656400	450.0	449.4	-0.6
562	207730	7656320	461.0	449.2	-11.8
576	232200	7602300	647.0	632.8	-14.2
577	252980	7611400	715.0	711.8	-3.2
686	230120	7615360	675.0	675.7	0.7
697	235950	7641000	646.2	628.7	-17.5
702	189890	7659710	436.0	431.4	-4.6
704	191270	7660500	454.3	442.9	-11.3
705	189101	7660710	457.3	434.7	-22.6
710	189180	7662380	462.0	443.7	-18.3
711	190650	7661030	458.4	440.4	-18.0
712	198600	7666400	485.4	491.0	5.6
714	188720	7658560	450.0	437.8	-12.2
718	189660	7657670	438.2	445.1	6.9
7507	216751	7638400	547.8	597.3	49.5
7574	173008	7653262	501.1	488.2	-12.9
7685	174414	7673285	463.0	475.6	12.6
DAERP-1	206128	7658305	437.0	455.2	18.2
DAERP-10	207021	7654444	453.0	448.6	-4.4
DAERP-11	209167	7656974	455.2	462.9	7.7
DAERP-12	206669	7654490	455.6	448.6	-7.0
DAERP-13	205572	7655952	455.7	450.8	-4.9
DAERP-14	205813	7655984	457.9	450.5	-7.4
DAERP-15	208381	7656291	458.0	453.4	-4.6
DAERP-16	205990	7652552	458.1	462.6	4.5
DAERP-17	208364	7658344	459.0	464.6	5.6
DAERP-18	208292	7653416	461.0	464.6	3.6
DAERP-19	205692	7660016	461.0	468.2	7.2
DAERP-2	207640	7655435	442.0	446.3	4.3
DAERP-20	210394	7656215	462.7	475.5	12.8
DAERP-21	204688	7660516	464.4	471.5	7.1
DAERP-22	204702	7653416	467.0	456.9	-10.1
DAERP-23	203854	7660359	467.0	471.2	4.2
DAERP-24	207155	7660749	468.0	474.7	6.7
DAERP-25	208266	7659472	470.0	471.4	1.4
DAERP-26	203961	7652548	470.0	466.5	-3.5
DAERP-27	203884	7660365	473.0	471.3	-1.7
DAERP-28	210394	7656834	476.5	477.9	1.4
DAERP-29	209620	7660046	478.0	482.6	4.6
DAERP-3	207320	7655919	442.0	446.1	4.1
DAERP-30	208633	7660878	478.0	483.0	5.0
DAERP-31	207325	7651826	478.0	475.4	-2.6
DAERP-32	206516	7651462	480.0	475.7	-4.3





Pozo	Coordenadas		Carga observada $h_{OBS}$ (msnm)	Carga calculada $h_{CALC}$ (msnm)	Residual, R (m)
	Este	Norte			
DAERP-33	209825	7653174	483.0	485.5	2.5
DAERP-34	210600	7656290	493.0	479.0	-14.0
DAERP-35	210796	7656176	494.0	481.8	-12.2
DAERP-36	208650	7663355	495.0	500.2	5.2
DAERP-37	206350	7648370	500.0	505.7	5.7
DAERP-38	212699	7651521	503.0	525.5	22.5
DAERP-39	210783	7661515	505.0	503.2	-1.8
DAERP-4	205370	7656709	444.0	452.3	8.3
DAERP-40	212469	7652726	506.0	517.2	11.2
DAERP-41	214701	7660630	506.5	525.5	19.0
DAERP-42	209518	7653966	507.0	476.3	-30.7
DAERP-43	211950	7661556	507.0	512.5	5.5
DAERP-44	210544	7656468	509.2	478.7	-30.5
DAERP-45	213709	7651973	511.0	532.9	21.9
DAERP-46	211792	7649686	518.0	528.3	10.3
DAERP-47	212201	7653621	521.0	509.9	-11.1
DAERP-48	209176	7646086	529.0	532.1	3.1
DAERP-49	207059	7646058	536.0	524.7	-11.3
DAERP-5	206018	7655822	444.6	449.9	5.3
DAERP-50	206609	7645402	541.0	527.6	-13.4
DAERP-51	216592	7657296	545.0	534.5	-10.5
DAERP-53	213814	7654791	547.8	522.3	-25.5
DAERP-54	214867	7653744	550.0	534.2	-15.8
DAERP-55	217197	7656262	554.0	535.5	-18.5
DAERP-56	215838	7655507	555.5	533.7	-21.8
DAERP-57	214892	7655035	555.5	530.3	-25.2
DAERP-6	207087	7655587	444.6	445.1	0.5
DAERP-7	207755	7657019	447.0	449.6	2.6
DAERP-8	207246	7655082	449.6	443.5	-6.1
DAERP-9	209271	7656351	452.0	459.5	7.5

EL diagrama de dispersión que presenta la Figura 13 muestra la curva de calibración que ilustra la coincidencia entre los niveles de agua calculados y observados. Como se puede ver en la figura, los puntos de calibración parecen estar dispersos al azar en relación con la línea de 1:1 (igualdad). La Figura 14 presenta las curvas de nivel de agua calculadas para el acuífero de areniscas Botucatú/Pirambaia.

En la Tabla 9 se presenta el resumen de las estadísticas de los residuales. La media residual es de 0,32 m, relativamente cerca a cero, lo que indica que el modelo calibrado no tiene un sesgo sistemático hacia subestimar o sobreestimar los niveles de agua.

**Tabla 9: Resumen del análisis estadístico**

Número de puntos de información	116
Residual máximo	52.118 m en el pozo 12
Residual mínimo	-0.396 m at Well 460
Residual medio	-0,831 m
Residual medio absoluto	12,52 m
Error estándar del estimativo	1,553 m
Raíz cuadrada de la media	16,672 m
Raíz cuadrada de la media normalizada	5,565 %
Coefficiente de correlación	0,948

Una estadística clave para la aceptación del modelo es la desviación estándar normalizada de los residuales, definida como:

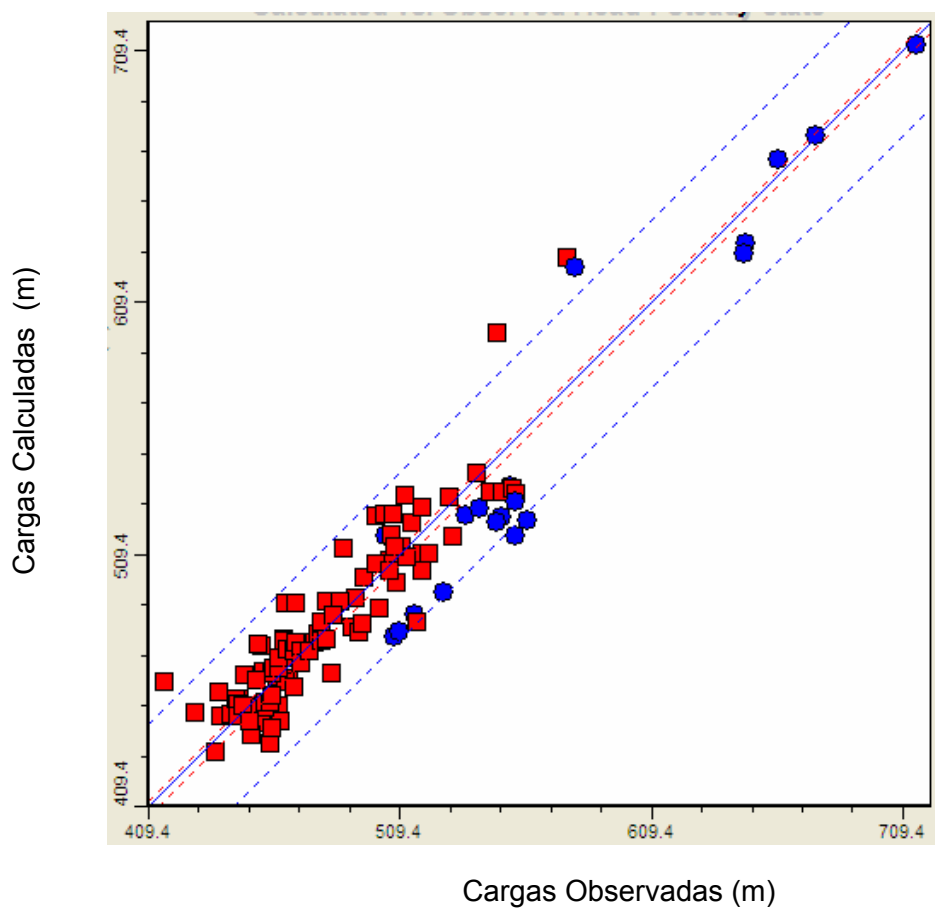
$$\text{RCMN (\%)} = \frac{\text{residual de raíz cuadrada de la media}}{\text{Rango de observaciones}} \times 100$$

El residual de la raíz cuadrada de la media (RCM) es de 20,07 m que corresponde a cerca del 5,7% del rango de los niveles de agua observados. Spitz y Moreno (1996; corregido 2003) sugieren que 10% del rango de observación es aceptable para un modelo de flujo de agua subterránea. Frecuentemente a esto se le conoce como el “estándar de la industria”.

El coeficiente de correlación entre los niveles de agua observados y calculados es de 0,937. De acuerdo con Spitz y Moreno (2003), para obtener un modelo de flujo calibrado adecuadamente, el coeficiente de correlación debe estar entre 0,7 y 1,0.

Los residuales absolutos mínimos y máximos son 0,03 m y -70,022 m, respectivamente, y el residual medio absoluto es 14,63 m. En la Figura 15 se muestra la distribución espacial de los residuales del modelo mediante símbolos a escala con respecto a la magnitud del residual. Como se ve en la figura, en algunos lugares los residuales positivos y negativos, relativamente grandes, se ubican muy cerca unos de otros, lo que sugiere que hay una variabilidad inherente en los objetivos de calibración que no puede incorporarse en el análisis. Los resultados que se presentan en la Figura 12 sugieren que los mismos objetivos de calibración tienen un alto grado de incertidumbre. Mediante un levantamiento topográfico de los pozos y la recolección de las series temporales de los niveles de agua en lugares claves se puede reducir la dispersión en la calibración.

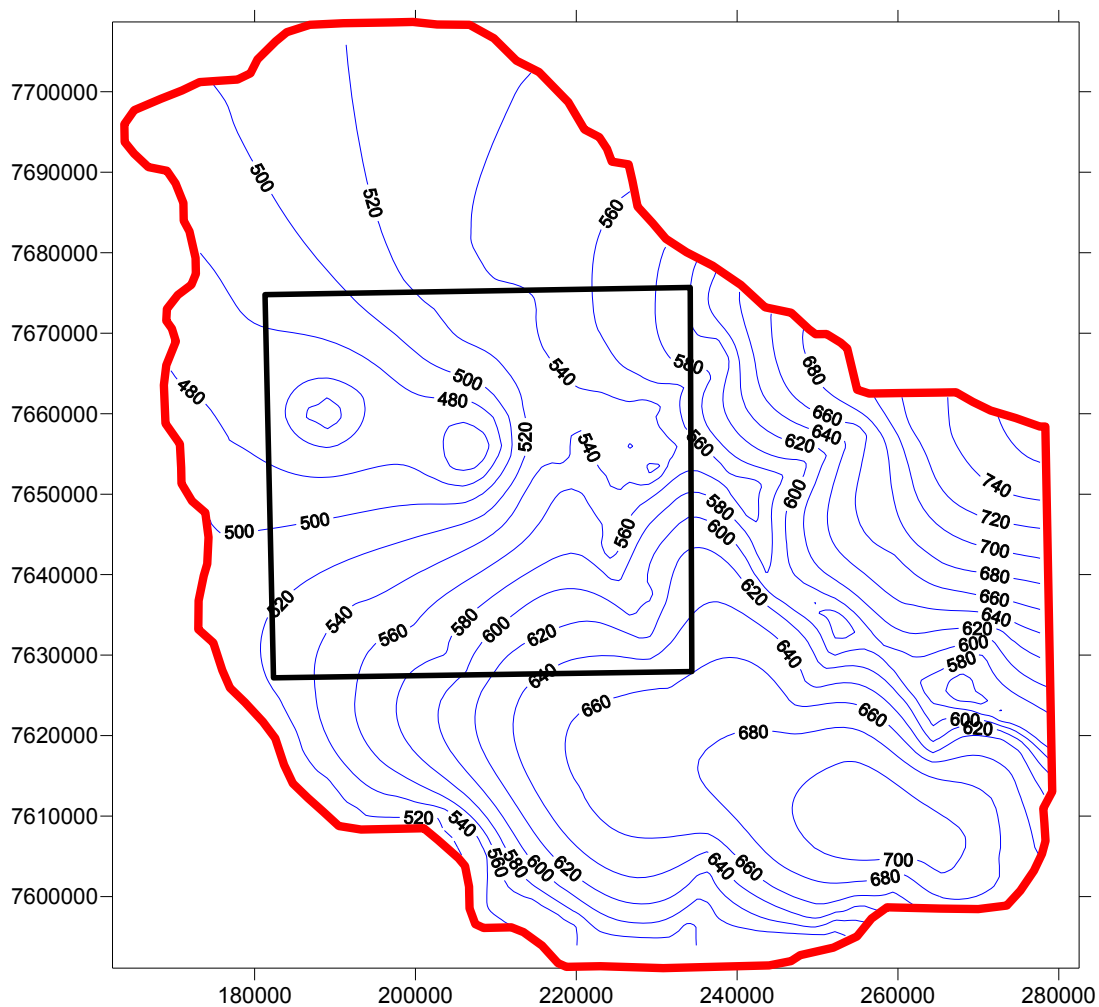
Sin embargo, es importante destacar que las variaciones en los niveles de agua a escala local también son una característica del flujo controlado por las fracturas en el acuífero de areniscas.



**Figura 13: Cargas calculadas vs. Cargas observadas – Régimen permanente**



**SNC-LAVALIN  
International**



**Figura 14: Cargas modeladas en el SAG**



En la Figura 16 se dibujó la distribución de probabilidad de los residuales del modelo. Hill (1998) sugirió que los residuales de la calibración del modelo deberían ser distribuidos normalmente. La gráfica se aproxima a una línea recta, lo que sugiere que la mayoría de los residuales son consistentes con una distribución normal.

En las Tablas 10 y 11 se presentan los valores finales de los parámetros conductividad hidráulica y tasas de recarga, respectivamente. La distribución espacial de la recarga se presenta en la Figura 17.

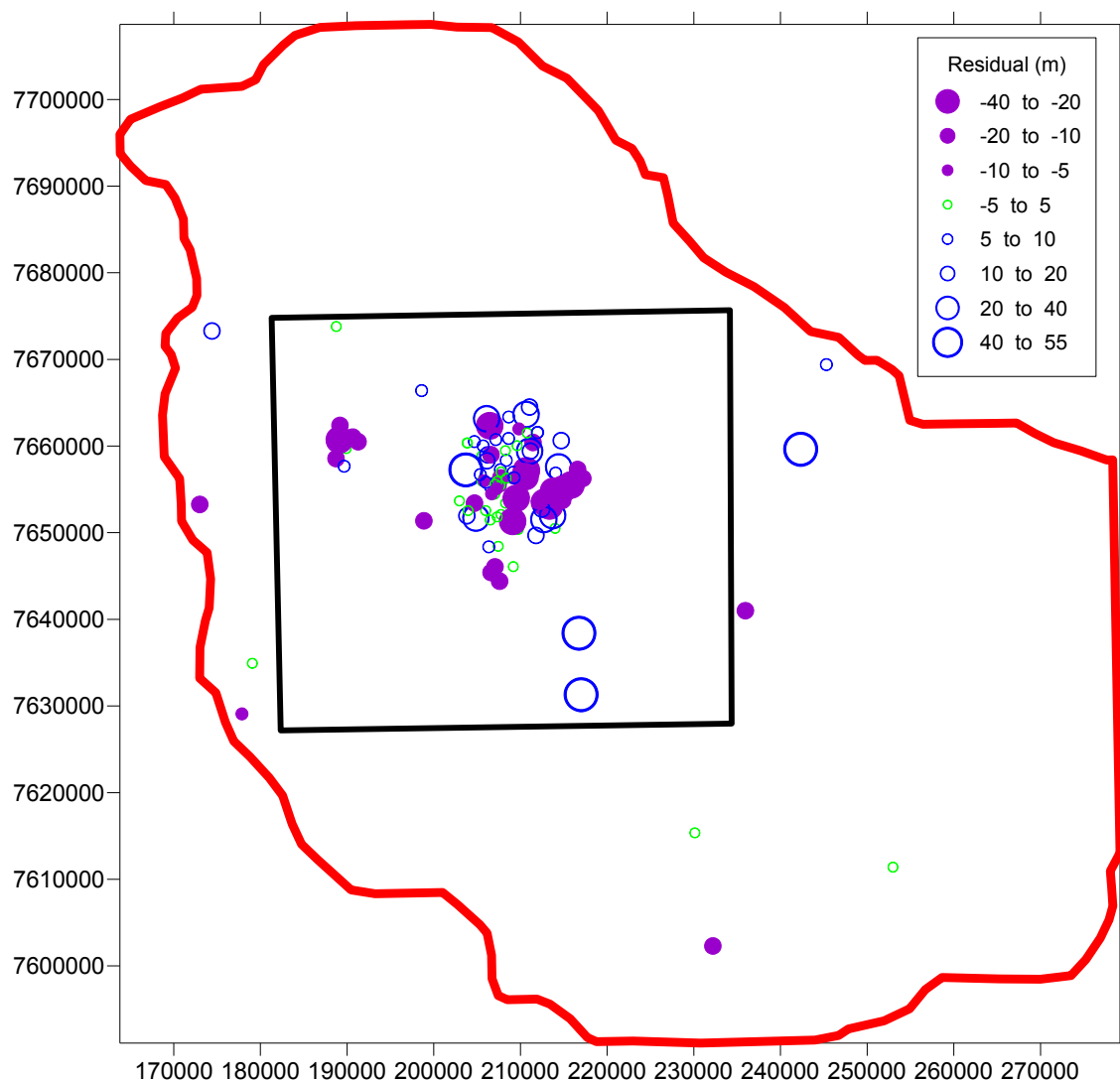
**Tabla 10: Conductividad hidráulica calibrada**

Formación	$k_x$ (m/d)	$k_y$ (m/d)	$k_z$ (m/d)
Basalto fracturado	0,86	0,86	0,086
Basalto	0,086	0,086	0,009
Arenisca	2,5	2,5	0,25

**Tabla 11: Tasas de recarga calibradas**

Área	Tasa de recarga (mm/año)
Urbana	55
Basalto fracturado	225
Basalto	15
Afloramiento de areniscas	200
Afloramiento del pérmico	40

En la Tabla 12 se presenta el balance hídrico deducido del modelo calibrado cuando todos los pozos bombean. Debido a que en el área piloto hay una sobreexplotación del agua subterránea, es necesario evaluar cual sería el balance hídrico si los pozos no estuvieran funcionando. Por lo tanto, se volvió a ejecutar el modelo calibrado suponiendo que los pozos estaban apagados, es decir no estaban bombeando. En la Tabla 12 también se muestra el balance hídrico resultante. Como se puede ver en la Tabla 12, en el balance calculado hay una discrepancia muy pequeña discrepancia muy pequeña entre los afluentes y efluentes totales, lo que indica que las ecuaciones del modelo se han resuelto correctamente, y que la solución numérica es aceptable.



**Figura 15: Distribución espacial de Residuales**



**SNC-LAVALIN**  
International

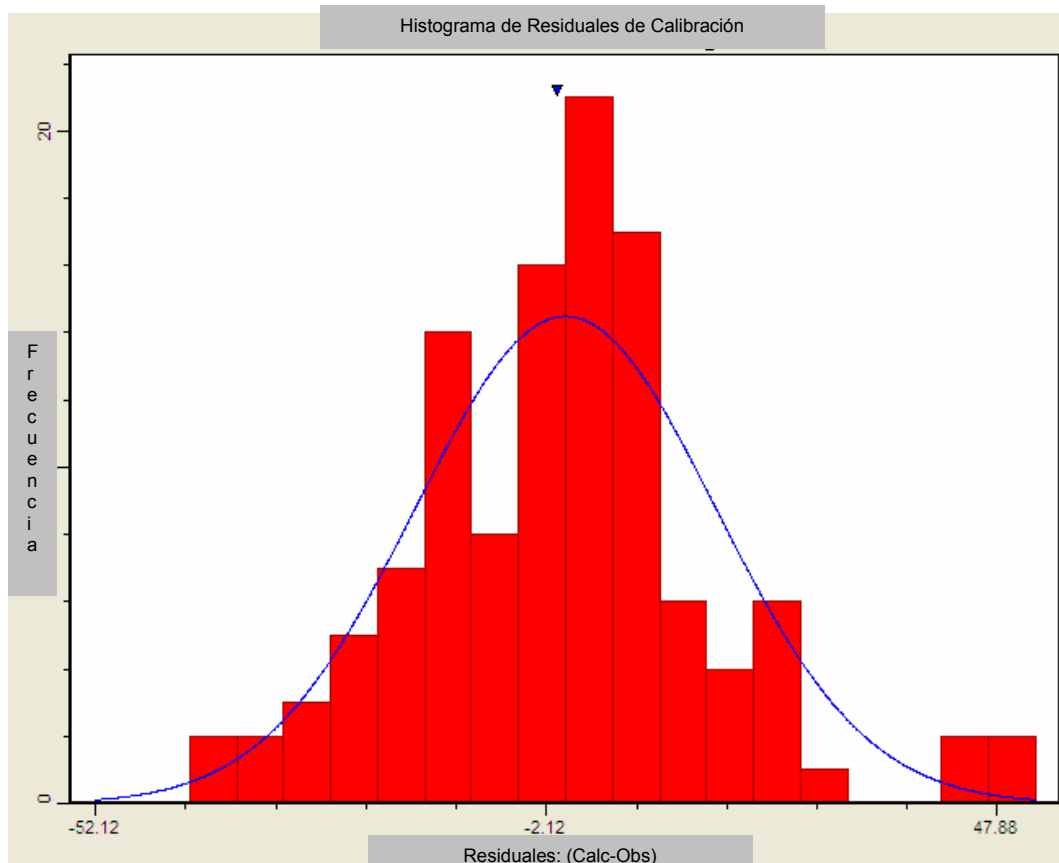


Figura 16: Histograma de Residuales de calibración



**SNC-LAVALIN**  
International



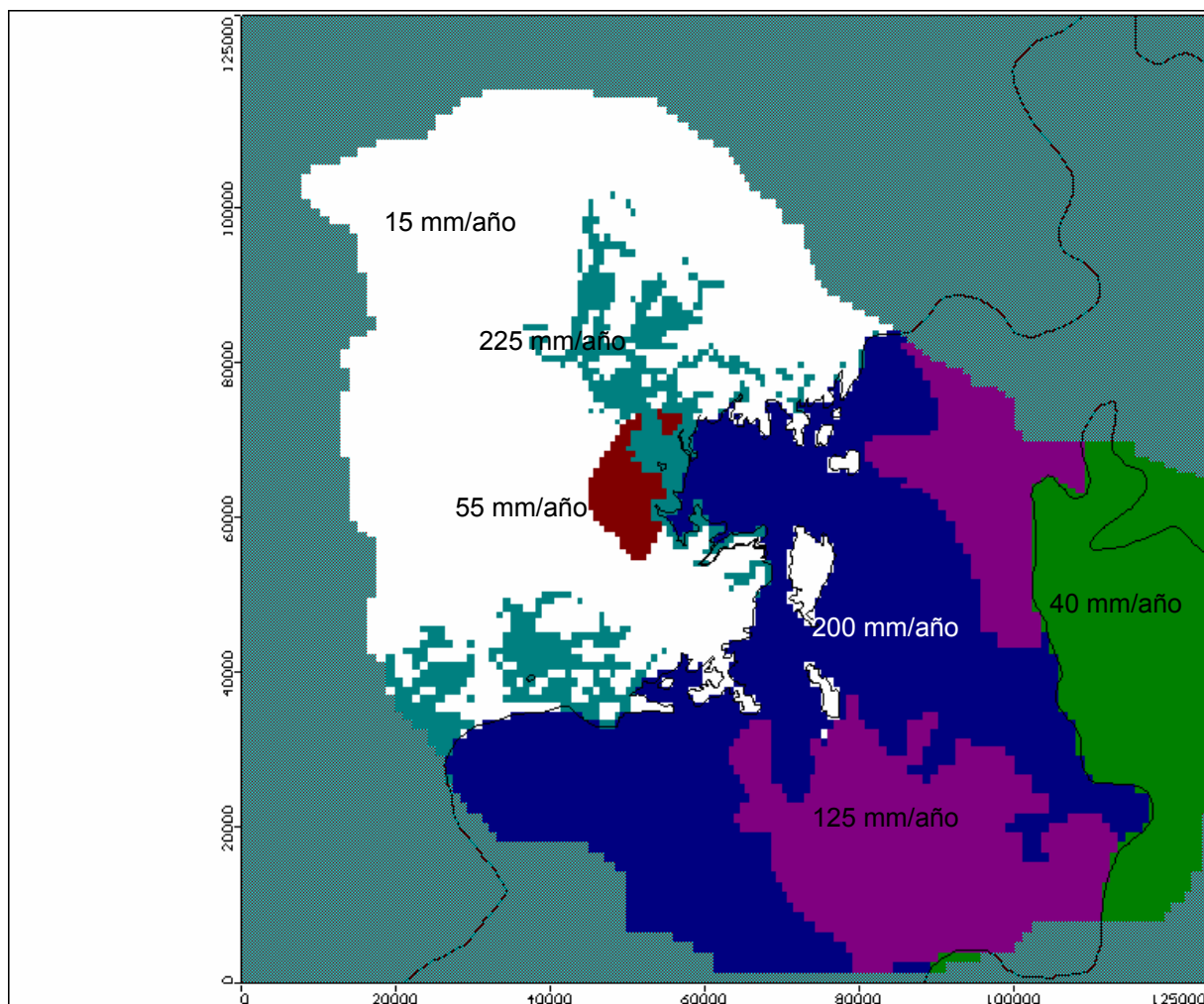


Figura 17: Distribución espacial de tasa de recarga





**Tabla 12: Balance hídrico para el área piloto**

Ítem	Con pozos bombeando		Sin pozos bombeando	
	Afluentes	Efluentes	Afluentes	Efluentes
	(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /día)
Recarga neta total	704,870		670,960	
Flujo lateral a través de bordes	270,416	136,206	178,443	379,303
Pozos	-	517,950	-	-
Drenajes (es decir, ríos)		321,130		470,110
Total	975,286	975,286	849,403	849,413
Discrepancia	0		10	
	0%		0%	

Se pueden hacer varias observaciones a partir de la Tabla 12. Primero, el balance hídrico para el caso de los pozos bombeando es cerca de 15 % mayor que en el caso en que los pozos no estaban bombeando. Este incremento en el volumen puede ser atribuido a los pozos de extracción, lo mismo que al incremento en el flujo a través de los bordes laterales del área piloto. El incremento marginal en la recarga que se observa en el caso de las bombas en operación puede ser el resultado de un nivel freático deprimido que incrementa el gradiente natural desde la zona de afloramiento y la tasa de recarga natural del basalto hacia la arenisca.

Segundo, el valor promedio de la recarga neta de 704.870 m<sup>3</sup>/día dentro del área piloto es 36% mayor que la demanda actual. Una observación importante que hay que hacer es el impacto significativo que la demanda de agua subterránea ha tenido sobre el volumen de agua que se descarga a través de los drenajes. Sin bombeo, la descarga calculada de agua subterránea a través de los drenajes es de 470,110 m<sup>3</sup>/día. Con las bombas en funcionamiento, la descarga calculada es de 321,130 m<sup>3</sup>/día.



## 6.0 VALIDACIÓN DEL MODELO

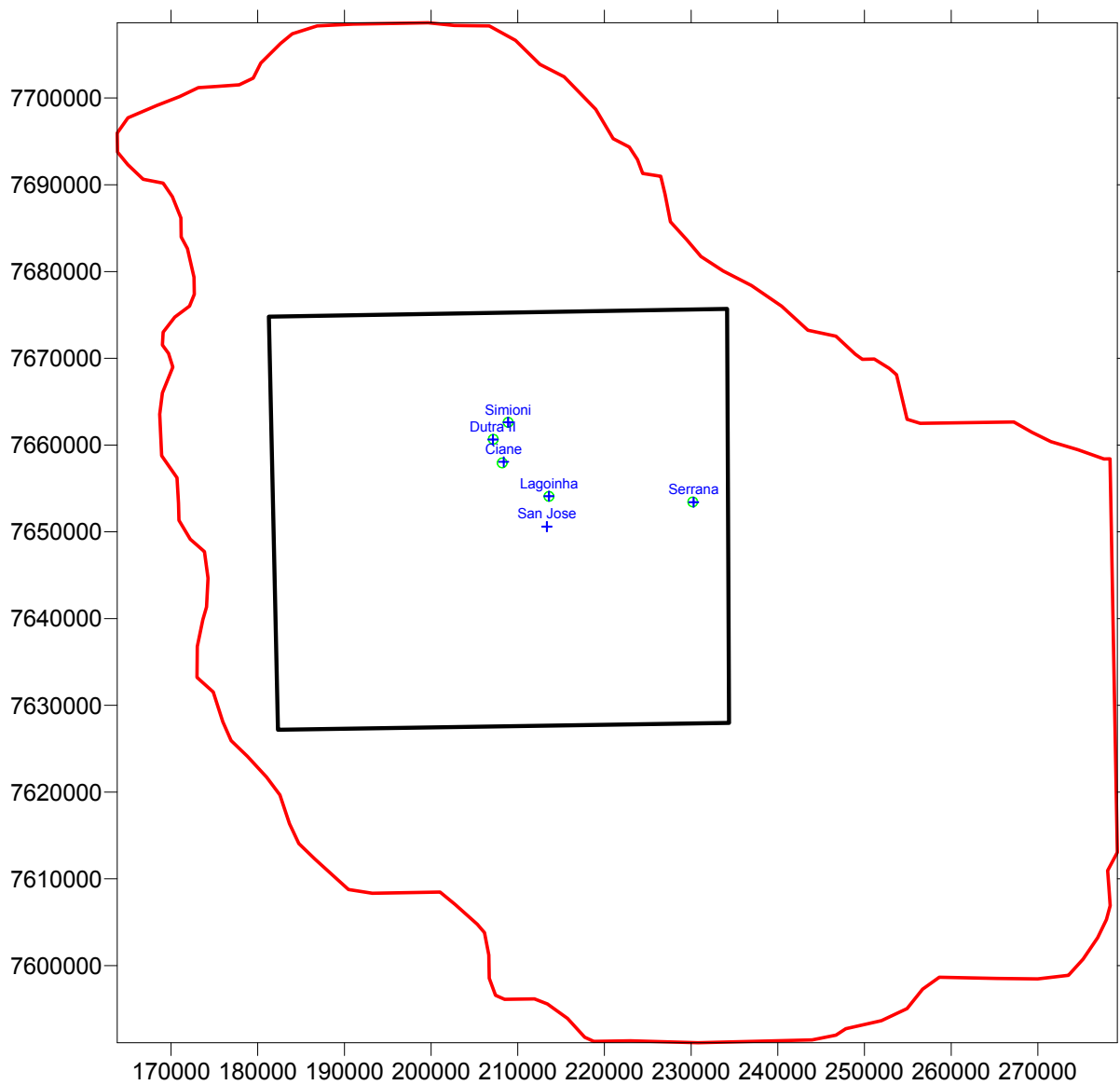
Una vez que se calibró el modelo en régimen permanente, se usó una versión en régimen transitorio para duplicar los resultados de los ensayos hidráulicos en cada pozo donde había información disponible. Esto constituyó la parte de validación del proceso de modelación. Las cargas piezométricas derivadas del modelo en régimen permanente se utilizaron como información de ingreso para el modelo en régimen transitorio.

Entre julio y agosto de 2007 se realizaron 7 ensayos hidráulicos en el área piloto Ribeirão Preto. Los ensayos hidráulicos se llevaron a cabo exitosamente en los siguientes 6 sitios: Ciane, Dutra, Lagoinha, San Jose, Serrana y Simioni. Todos los ensayos, excepto el ensayo en San Jose, incluyeron pozos de bombeo y de observación. En la Figura 18 se muestra la ubicación de los pozos y en la Tabla 13 se resumen los detalles de los ensayos hidráulicos.

**Tabla 13: Detalles de los ensayos hidráulicos**

Ensayo hidráulico	Caudal de bombeo (m <sup>3</sup> /h)	ID del Pozo	Tipo de pozo	Duración ensayo (horas)	Distancia radial (m)	Abatimiento máximo (m)
Ciane	190,0	100/003	Bombeo	28	0	20,7
		100/275	Observación		216	2,3
Dutra II	221,0	100/097	Bombeo	72	0	38,7
		100/098	Observación		44	0,5
Lagoinha	208,0	100/044	Bombeo	50	0	25,5
		Lagoinha I	Observación		19	8,6
San Jose	239,0	100/047	Bombeo	18	0	27,0
Serrana	85,0	101/011	Bombeo	17	0	10,3
		101/012	Observación		107	3,9
Simioni	229,0	100/001	Bombeo	72	0	27,8
		100/002	Observación		5	12,6

Cuando se introdujeron los detalles de los ensayos hidráulicos en el modelo, en las vecindades de los pozos de abstracción se redujo el espaciamiento de la cuadrícula desde 600 m hasta tamaños que variaron entre 0,5 m a 5 m para obtener un mejor control durante la calibración contra los resultados de los ensayos hidráulicos. Esto incrementó el número total de las celdas a 97.847 celdas activas por capa. Adicionalmente, la capa de arenisca se subdividió en cuatro sub-capas.



**Figura 18: Ubicación de ensayos hidráulicos**



El modelo se ejecutó luego en condiciones de régimen transitorio, inicialmente activando los pozos de manera separada y ejecutando el modelo durante la duración de cada ensayo hidráulico. Esto se repitió para cada pozo y el éxito del proceso de validación se evaluó al comparar los abatimientos observados y calculados para los ensayos hidráulicos. La Tabla 14 presenta los resultados simulados versus los observados para los ensayos hidráulicos en los pozos.

**Tabla 14: Resultados simulados versus observados para los ensayos hidráulicos**

Ensayo hidráulico	ID Pozo	Tipo pozo	Distancia radial (m)	Abatimiento máximo (m)	Abatimiento predicho (m)	Abatimiento calculado corregido (m)
Ciane	100/003	Bombeo	0	20,7	19.21	21.29
	100/275	Observación	216	2,3	2.59	2.59
Dutra II	100/097	Bombeo	0	38,7	23.3	35.83
	100/098	Observación	44	0,5	9.7	9.70
Lagoinha	100/044	Bombeo	0	25,5	32.86	28.15
	Lagoinha I	Observación	19	8,6	17.23	17.23
San Jose	100/047	Bombeo	0	27	23.15	27.11
Serrana	101/011	Bombeo	0	10,3	9.12	11.09
	101/012	Observación	107	3,9	1.61	2.71
Simioni	100/001	Bombeo	0	27,8	25.25	26.69
	100/002	Observación	5	12,6	13.90	13.90

La carga corregida que se muestra en la Tabla 14 se calculó aplicando dos correcciones a los valores de abatimiento calculados por el modelo. La primera corrección se debe a que el diámetro del pozo es menor en relación al tamaño del bloque de la cuadrícula de MODFLOW que contiene el pozo (aquí el tamaño mínimo de cuadrícula es 0,5 m alrededor de los pozos de bombeo, comparados con 102 mm de diámetro de los pozos). La corrección puede ser interpretada como un abatimiento adicional debido al flujo convergente dentro del bloque de cuadrícula que contiene al pozo de bombeo.

Según Peaceman (1983), este abatimiento adicional puede calcularse con la fórmula de Thiem:

$$\delta_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left\{ \frac{r_e}{r_w} \right\}$$



Dónde  $\delta_1$  es el abatimiento adicional,  $Q$  es el caudal de bombeo,  $T$  es la transmisividad,  $r_e$  es el radio efectivo del bloque de pozo, y  $r_w$  es el radio del pozo. Para bloques cuadrados y conductividad hidráulica horizontal isotrópica, el radio efectivo del bloque de pozo se estima como  $0,208\Delta x$ , dónde  $\Delta x$  es el espaciamiento de la cuadrícula.

La segunda corrección considera el hecho de que el intervalo abierto de los pozos de bombeo penetra una parte relativamente pequeña del espesor total de la arenisca del acuífero. Como una primera aproximación, se puede mostrar que para un acuífero verticalmente anisotrópico la transmisividad efectiva se proporciona de acuerdo a la longitud del intervalo abierto. (Cooper et al., 1967):

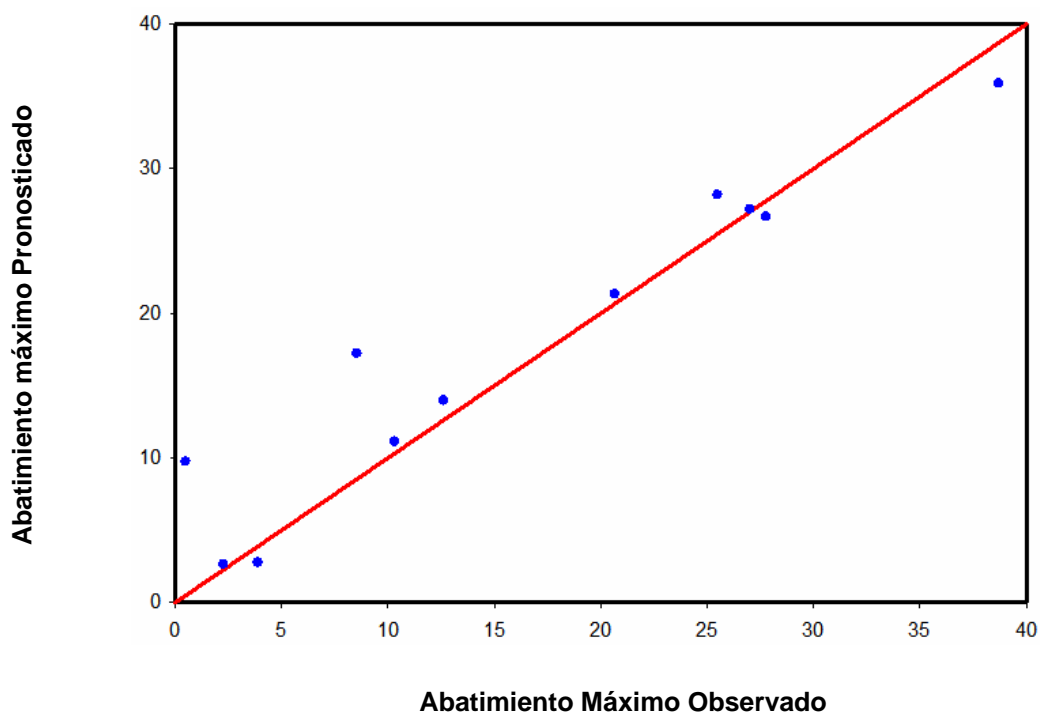
$$T_{eff} = T \frac{L}{B}$$

Dónde  $T$  es la transmisividad total de la arenisca,  $L$  es la longitud del intervalo abierto del pozo, y  $B$  es el espesor total de la arenisca del acuífero. Los cálculos del modelo asumen implícitamente que los pozos penetran todo el espesor del acuífero. Como la capacidad de un pozo es directamente proporcional a la transmisividad, el abatimiento corregido se estima como:

$$s_{corr} = \frac{B}{L} (s_{calc} + \delta_1)$$

Dónde  $s_{calc}$  es el abatimiento calculado por el modelo.

En la Figura 19 se observan los abatimientos máximos observados comparados con los abatimientos calculados por el modelo. Como puede observarse en la figura, los valores pronosticados de abatimientos máximos se asemejan a los valores observados de abatimientos máximos, salvo en los pozos de observación Lagoinha y Dutra. Sin embargo, la consistencia de la tendencia general sugiere que el modelo proporciona una representación adecuada del sistema físico bajo condiciones de bombeo.



**Figura 19: Máximo abatimiento pronosticado vs Máximo abatimiento observado**





## 7.0 MODELACIÓN PREDICTIVA

### 7.1 Objetivos

El objetivo primario del modelo informático del área piloto Ribeirão Preto es ayudar en la planificación del desarrollo futuro de nuevos campos de pozos para suministrar agua a la ciudad de Ribeirão Preto. Se asumió que esos nuevos campos de pozos cubrirán la demanda creciente futura de agua impulsada por el crecimiento de la población y la demanda comercial e industrial potencial. La Tabla 15 resume la proyección del crecimiento de la población para todos los municipios ubicados dentro del área piloto Ribeirão Preto.

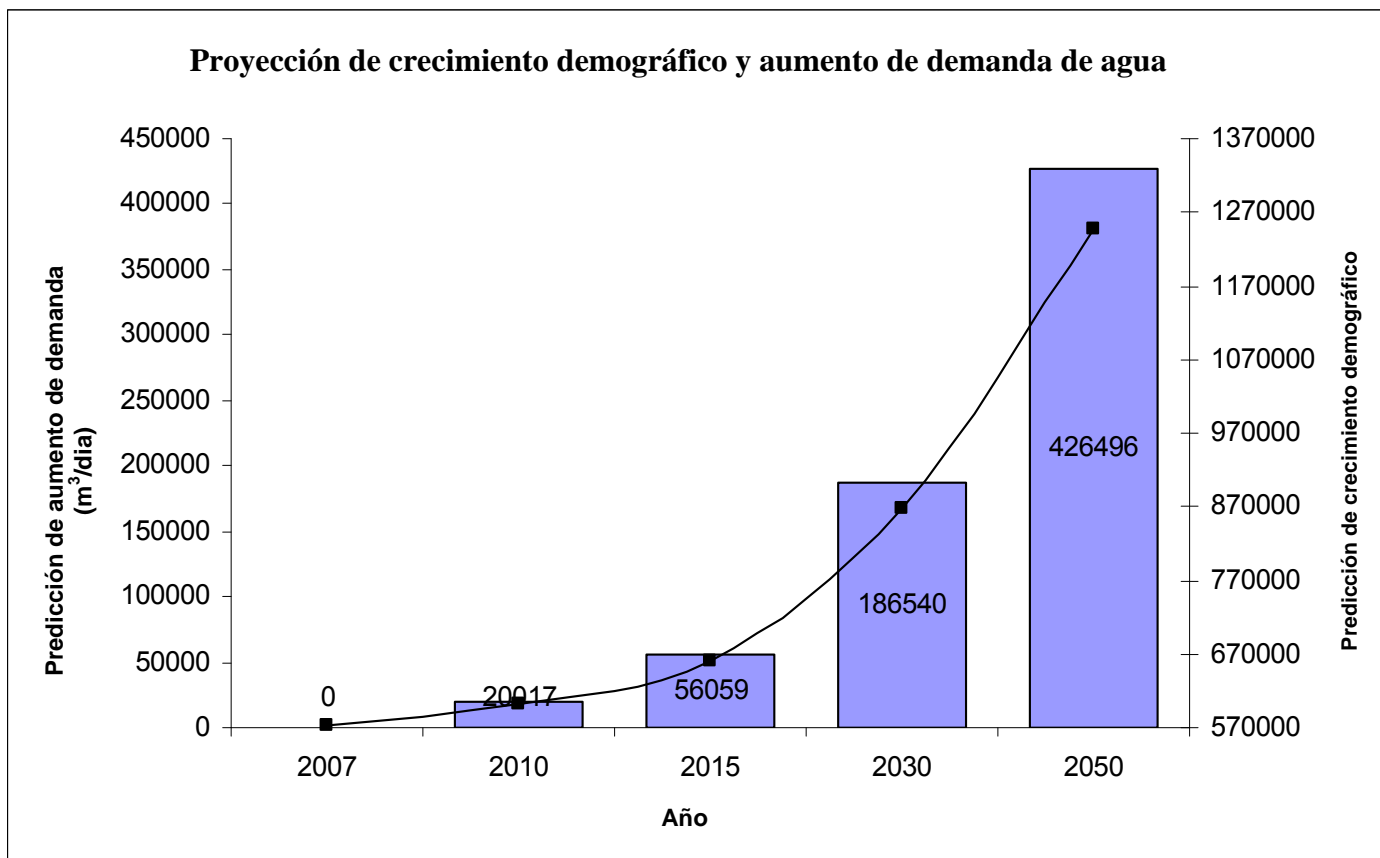
**Tabla 15: Resumen de proyección de población para el área Ribeirão Preto**

Municipio	2007	2010	2015	2030	2050
Altinópolis	17.390	18.354	20.176	27.574	43.644
Cravinhos	34.582	37.727	43.725	68.797	127.065
Jardinópolis	37.493	40.919	47.453	74.967	140.295
Ribeirão Preto	571.714	603.487	660.697	867.809	1.248.692
Serrana	42.707	47.996	58.367	105.476	233.362
Sertãozinho	109.839	117.201	130.745	182.703	287.846
<b>Área piloto</b>	<b>813.725</b>	<b>865.684</b>	<b>961.164</b>	<b>1.327.326</b>	<b>2.080.904</b>

El crecimiento esperado en la demanda de agua subterránea se obtuvo usando el pronóstico de crecimiento de población y un consumo per capita de 0,63 m<sup>3</sup>/día. Este factor se estableció al trazar la población histórica y la información de consumo de agua, lo que resultó en un consumo residencial promedio per capita de 0,3 m<sup>3</sup>/día, como se observa en la Tabla 16. Esta tasa de consumo se duplicó para tener en cuenta los usos comerciales, industriales e institucionales, y se agregó un factor de pérdidas de cerca del 10%. En la Figura 20 se presenta el resultado del crecimiento de la población y la demanda de agua para la ciudad de Ribeirão Preto.



- Aumento de demanda m<sup>3</sup>/día
- Población



**Figura 20: Proyección de crecimiento demográfico y futura demanda adicional de agua en la Municipalidad de Ribeirão Preto**



**SNC•LAVALIN  
International**



**Tabla 16: Resumen de crecimiento de población y demanda de agua para el municipio de Ribeirão Preto (Según Guido, 2004)**

Año	Población	Demanda de agua (m <sup>3</sup> /día)	Relación Demanda/Población (L/día/cap)
1960	145.267	43.580	300,0
1970	211.330	63.400	300,0
1980	308.637	92.050	298,2
1990	412.533	123.760	300,0
2000	502.002	160.600	319,9
2002	542.015	162.600	300,0

## 7.2 Escenarios

En total se examinaron tres (3) escenarios usando el modelo calibrado y validado. Los escenarios se describen a continuación.

- Escenario 1 - Campo de pozos al este del Anillo Vial de la ciudad de Ribeirão Preto.

El primer escenario asume que el incremento en la demanda se cubre enteramente con un campo de pozos a desarrollar al este del Anillo Vial, dentro de la zona de afloramiento. El campo de pozos que se desarrollaría para cubrir la creciente demanda de agua se simuló usando 5 pozos, cada uno diseñado para satisfacer 1/5 de la demanda a lo largo del período representado.

- Escenario 2 – Campo de pozos al sur del Anillo Vial de la ciudad de Ribeirão Preto.

El segundo escenario asume que el incremento en la demanda se cubre enteramente con un campo de pozos a desarrollar al sur del anillo vial, en un área cubierta por basalto. El campo de pozos que se desarrollaría para cubrir la creciente demanda de agua se simuló usando 5 pozos, cada uno diseñado para satisfacer 1/5 de la demanda a lo largo del período representado.

- Escenario 3 – Campos de pozos en el este y en el sur del Anillo Vial de la ciudad de Ribeirão Preto.

En este tercer escenario se asumió que el 60 % de la demanda de agua sería del sur del Anillo Vial y 40 % del este del Anillo Vial.

La Tabla 17 resume los caudales de bombeo para cada escenario, y en la Figura 21 se muestra la ubicación de los campos de pozos.



**Tabla 17: Resumen de caudales de bombeo (m<sup>3</sup>/día) del Modelo para análisis de escenarios**

Año	Escenario			
	1	2	3	
	Campos de pozos al Este	Campos de pozos al Sur	Campos de pozos al Este	Campos de pozos al Sur
2008	0	0	0	0
2010	20.017	20.017	8.007	12.010
2015	56.059	56.059	22.424	33.636
2030	186.540	186.540	74.616	111.924
2050	426.496	426.496	170.598	255.898

### 7.3 Resultados de la predicción

#### 7.3.1 Escenario 1

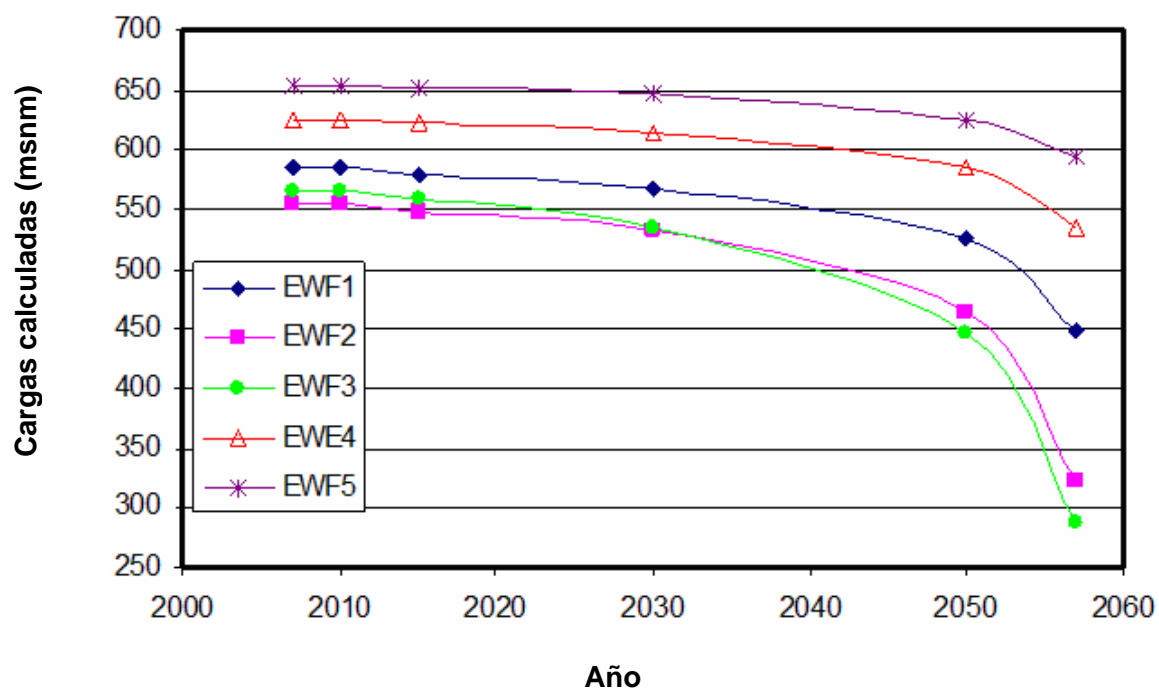
Los resultados del Escenario 1 se resumen en la Tabla 18, se muestran en la Figura 22 e indican una reducción continua en las cargas de agua subterránea que producen abatimientos finales significativos al final del año 2057 fluctuando entre 58 m en el campo de pozos EWF5 y 279 m en el campo de pozos EWF3. En la Figura 23 se observa el mapa de curvas de las cargas al final del año 2050, donde se ve la influencia de los campos de pozos.

Los abatimientos significativos pronosticados, especialmente en los campos de pozos EWF1, EWF2 y EWF3, sugieren que los caudales de extracción necesarios no podrían ser sostenibles más allá del año 2030.

**Tabla 18: Resumen de cargas predichas para el Escenario 1**

Año	Campo de pozos Este				
	EWF1	EWF2	EWF3	EWF4	EWF5
2007	585	554	566	626	653
2010	585	554	566	626	653
2015	579	548	558	623	651
2030	568	533	535	615	646
2050	526	465	447	585	626
2057	448	323	287	535	595
<b>Abatimiento final (m)</b>	<b>137</b>	<b>231</b>	<b>279</b>	<b>91</b>	<b>58</b>





Referencia: EWF – Campo de Pozos

Figura 22: Cargas pronosticadas para Escenario 1



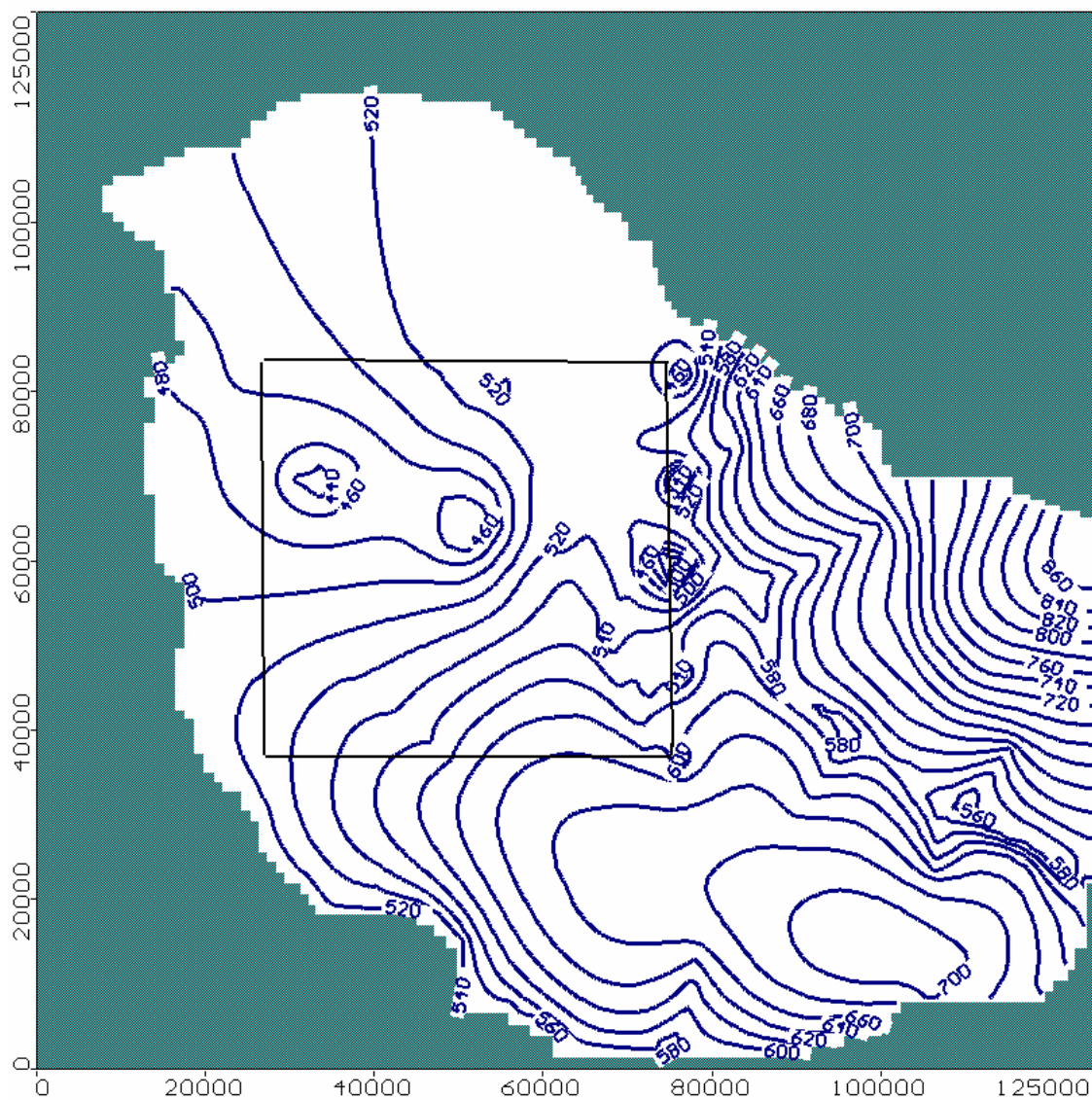


Figura 23: Cargas pronosticadas para el año 2050 con Escenario 1





### 7.3.2 Escenario 2

Los resultados del Escenario 2 se resumen en la Tabla 19, se muestran en la Figura 24 e indican una reducción continua en las cargas de agua subterránea que producen abatimientos finales significativos al final del año 2057 fluctuando entre 67 m en el campo de pozos SWF1 y 161 m en el campo de pozos SWF4. En la Figura 25 se observa el mapa de curvas de las cargas al final del año 2050, donde se ve la influencia de los campos de pozos.

El máximo abatimiento de 161 m pronosticado para este Escenario 2 es significativamente menor que el pronosticado para el Escenario 1, pero el abatimiento mínimo es mayor en el Escenario 2. Los resultados sugieren que los caudales de extracción necesarios serían insostenibles mas allá del año 2030, pero son menos drásticos que en el Escenario 1.

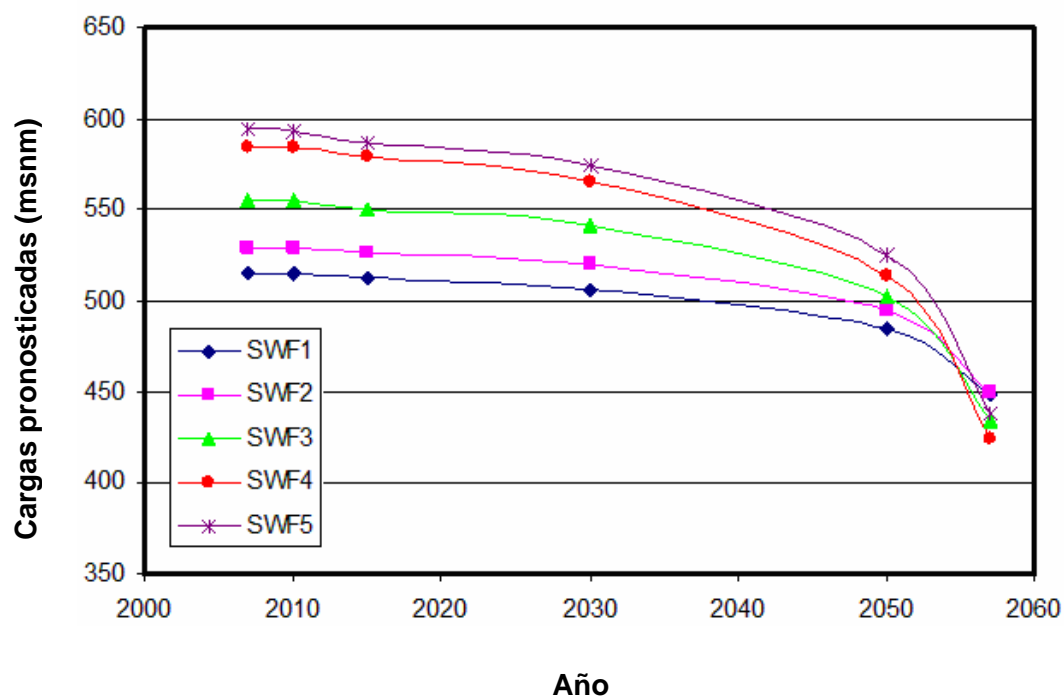
**Tabla 19: Resumen de cargas pronosticadas para el Escenario 2**

Año	Campo de pozos Sur				
	SWF1	SWF2	SWF3	SWF4	SWF5
2007	515	529	556	585	594
2010	515	529	556	585	593
2015	512	526	551	579	587
2030	506	520	541	565	574
2050	485	495	502	514	525
2057	448	449	434	424	438
<b>Abatimiento final (m)</b>	<b>67</b>	<b>80</b>	<b>122</b>	<b>161</b>	<b>156</b>

### 7.3.3 Escenario 3

En la Tabla 20 se resumen los resultados del Escenario 3. Como puede verse, hay una disminución continua en las cargas de agua subterránea que producen abatimientos finales significativos en el año 2057. En los campos de pozos ubicados en el Este (EWF), los valores del abatimiento varían entre 25 m en EWF5 y 109 m en EWF3, mientras que en los campos de pozos ubicados al Sur (SWF) los abatimientos varían entre 40 m en SWF1 y 101 m en SWF4. En la Figura 26 se observa el mapa de curvas de las cargas al final del año 2050, donde se ve la influencia de los campos de pozos.

Los resultados muestran que los abatimientos pronosticados para este escenario son significativamente menores que los pronosticados para los Escenarios 2 y 3. Sin embargo, aún así hay abatimientos muy altos de alrededor de 100 m en los campos de pozos EWF3, SWF4 y SWF5 que sugieren que es posible que los caudales de producción necesarios no sean adecuadamente sostenibles.

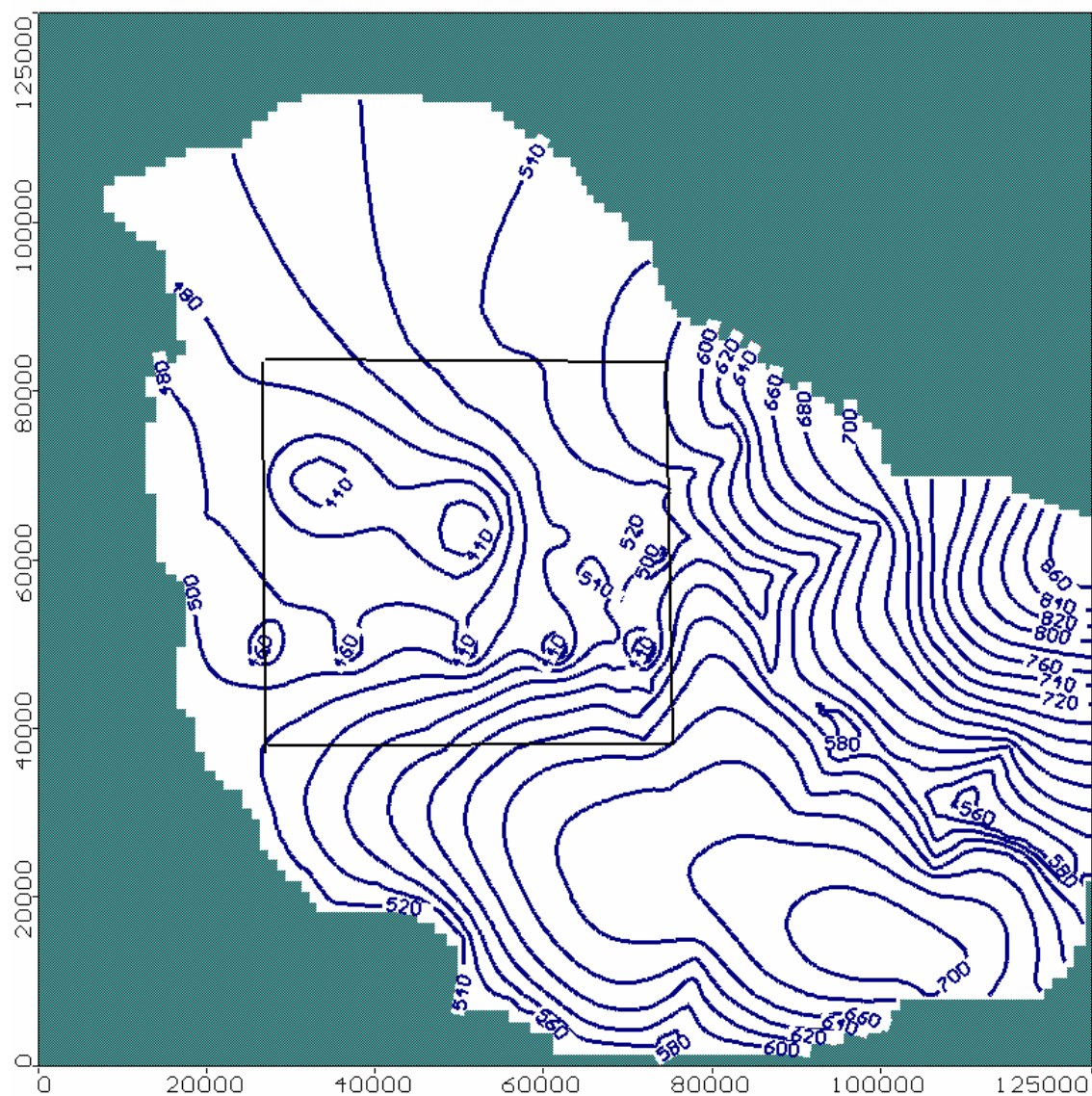


Referencia: EWF – Campo de Pozos

Figura 24: Cargas pronosticadas para Escenario 2



**SNC-LAVALIN**  
International



**Figura 25: Cargas pronosticadas para el año 2050 con Escenario 2**



**SNC•LAVALIN**  
**International**



**Tabla 20: Resumen de cargas pronosticadas para el Escenario 3**

Año	Campo de pozos Este					Campo de pozos Sur				
	EWf1	EWf2	EWf3	EWf4	EWf5	SWf1	SWf2	SWf3	SWf4	SWf5
2007	585	554	566	626	653	515	529	556	585	594
2010	585	554	566	626	653	514	529	556	585	594
2015	583	552	563	625	652	513	527	553	581	590
2030	579	546	554	621	650	509	523	547	573	581
2050	562	525	520	606	641	497	509	524	543	549
2057	533	477	457	582	628	475	483	484	489	493
<b>Abatimiento final (m)</b>	<b>52</b>	<b>77</b>	<b>109</b>	<b>44</b>	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>46</b>	<b>72</b>	<b>96</b>	<b>101</b>





## 8.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Limitaciones del Modelo numérico

Domenico (1972) observó que un modelo es una representación de la realidad que intenta explicar el comportamiento de algunos aspectos de dicha realidad, y mencionó que el modelo siempre es menos complejo que el sistema que representa. Así mismo, Wang y Anderson (1982) indicaron que un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad. No importa que tan sofisticado sea un modelo, nunca podrá describir el sistema de agua subterránea estudiado sin que la simulación del modelo se desvíe del proceso físico real (Spitz y Moreno, 1996). Aún más importante, los mismos autores observaron que los modelos numéricos no dan respuestas exactas a problemas que no están lo suficientemente definidos.

En el caso del área piloto Ribeirão Preto, aunque hay numerosos pozos y abundante información, ninguno de ellos penetra completamente el acuífero de forma que se pueda deducir una isopaca exacta y usarla en la modelación. Adicionalmente, la información de la mayoría de los pozos/perforaciones no hace una diferencia clara entre las dos formaciones principales (Botucatú y Piramboia) que forman el acuífero Guaraní, por lo que para el presente ejercicio de modelación esas dos formaciones se consideraron como una sola.

Los otros asuntos que afectan significativamente los resultados de la modelación son los caudales de bombeo a los cuales operan los pozos en la actualidad y los niveles dinámicos y estáticos de agua actuales. Sobre los caudales de bombeo, se ha reportado un caudal único para los pozos. Aunque fue claramente especificado para algunos de los pozos, hay muchos pozos para los cuales no hay información disponible para confirmar que los caudales reportados son promedios representativos o tan siquiera si los pozos están activos. Para este análisis se asumió que los caudales reportados representan valores promedio a largo plazo.

Parece haber un alto grado de incertidumbre en los datos de nivel de agua reportado para los pozos y usados en la modelación. La incertidumbre estuvo principalmente relacionada con el momento en que se recolectaron los niveles de agua y la condición de operación del pozo. La dispersión en la calibración puede reducirse haciendo un levantamiento de los pozos y recolectando los datos de los niveles de agua durante series de tiempo.





## 8.2 Resultados del Modelo numérico

A pesar de la falta de caudales de bombeo y niveles de agua exactos, el modelo parece generar curvas piezométricas que, por lo general, concuerdan con las cargas observadas y abatimientos interpretados. Los resultados de la modelación sugieren que la mayoría (cerca del 74%) de la recarga neta total (alrededor de 704,870 m<sup>3</sup>/día) del acuífero dentro del área de estudio se descarga a través de pozos. Los resultados de la modelación, basados en la demanda pronosticada de agua subterránea, también sugieren que la demanda de agua subterránea alcanzaría la tasa de recarga total del acuífero alrededor del año 2020.

Los resultados de los escenarios de la modelación predictiva sugieren que los campos de pozos ubicados al sur y al este del Anillo Vial proporcionarían una tasa de producción sostenible hasta alrededor del año 2030. Más allá de ese año, se deberían usar otras fuentes, es decir aguas superficiales, para complementar el suministro de agua potable.

## 8.3 Recomendaciones

Se han llevado a cabo varios ejercicios de modelación para áreas que incluyen el área piloto Ribeirão Preto. Hasta cierto punto esos modelos han tenido éxito en simular exactamente las condiciones del agua subterránea en el área. Por esto, se recomienda que no se lleven a cabo modelaciones adicionales del área piloto hasta que se recolecte nueva información.

A fin de mejorar y completar la información del área de estudio se recomienda que se implemente un programa de adquisición de información por toda el área piloto. Este programa debería incluir lo siguiente:

- Pasos para asegurar que todos los dueños de pozos en el área piloto mantengan buenos registros de extracción, y que los remitan regularmente a una agencia central;
- Se debería exigir a todos los dueños de pozos que registren el uso mensual de agua por medio de medidores totalizadores.
- Perforación de series de pozos de diámetro pequeño con el fin de recolectar información geológica e hidrogeológica tanto dentro de los campos de pozos existentes como en las demás zonas en el área piloto, especialmente entre las ciudades donde se agrupan la mayoría de los pozos. Se deberían recolectar núcleos y registrarlos geológicamente con el fin de determinar más exactamente los



contactos sub-superficiales entre las diferentes unidades del acuífero Guaraní e, idealmente, se deberían hacer ensayos de obturación (packer testing) en cada perforación para determinar los perfiles de permeabilidad a través del acuífero. En cada uno de esos sitios, una vez se haya completado el pozo principal y se haya llevado a cabo el ensayo de obturación, se debería hacer una perforación intermedia y somera lo largo del primer agujero, con el fin de crear un nido de piezómetros con fines de monitoreo. No sería necesario muestrear y hacer ensayo de obturación en las perforaciones intermedias y someras, ya que la información habría sido recolectada en la perforación primaria. Las tres perforaciones en cada sitio deberían completarse con filtros de PVC de diámetro 50 mm y también deberían revestirse.

- Identificación de los pozos y perforaciones existentes abandonados que podrían incorporarse en una red de monitoreo piezométrico junto con las perforaciones descritas anteriormente. Los niveles estáticos de agua deberían medirse, al menos, una vez al mes y, si es posible, se deberían instalar transductores en algunos pozos para el monitoreo continuo del nivel del agua.
- Se debería llevar a cabo un estudio hidrológico para obtener una mejor apreciación del flujo de agua superficial por toda el área de estudio. Si en la actualidad no existen estaciones de aforo, se deberían instalar en las principales corrientes y ríos y se deberían hacer mediciones de caudales bajos en la mayor cantidad de corrientes posibles, con el fin de estimar las contribuciones al caudal de base.
- Se debería fomentar que las agencias públicas de suministro de agua lleven a cabo perforaciones exploratorias y ensayos en áreas nuevas, alejadas de las áreas actualmente sobreexplotadas. Las áreas ubicadas al sur del Anillo Vial, entre las ciudades de Ribeirão y Cravinhos, podrían ser áreas potenciales de exploración. Se deberían hacer ensayos hidráulicos extensos en todos los pozos nuevos.
- Solo se debería actualizar el modelo numérico del área cuando se hayan implementado los programas mencionados anteriormente y se haya recolectado una cantidad razonable de información nueva.
- Dados los incrementos pronosticados en la demanda de agua subterránea se perforarán pozos adicionales dentro de un programa de desarrollo en fases a lo largo de un período de años. Luego de la construcción y puesta en funcionamiento de cada campo de pozos debería haber un programa amplio de monitoreo de la magnitud del impacto de ese campo de pozos sobre las condiciones existentes del





agua subterránea, antes de instalar el siguiente campo de pozos. Este enfoque ayudará a optimizar la ubicación de los campos de pozos. Cada pozo nuevo que se perfora debería ser registrado geológicamente e, idealmente, se deberían hacer ensayos de obturación en cada perforación para determinar los perfiles de permeabilidad a través del acuífero.

- Las ubicaciones de los campos de pozos que se simularon en los diferentes Escenarios no están optimizadas. Se necesitará una optimización para ubicar apropiadamente los campos de pozos siguiendo el desarrollo en fases y el enfoque de evaluación descrito anteriormente.



## REFERENCIAS

- Araújo, L.M., França, A.B. and 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, pp. 317-336.
- Aqua Bavaria Guaraní (2005). Um exemplo de Solução Integrada para a Criação de Áreas de Proteção de Captações destinadas ao Abastecimento Público com Uso de Modelos de Sustentabilidade e Sistemas Avançados de Suporte de Tecnologia de Informação, 40p.
- Borghetti N.R.B., Borghetti J.R.E. and Rosa Filho E.F. (2004). Aquífero Guaraní – A verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba – PR.
- Caetano-Chang, M. R. and WU, F. T. (1992). Bacia do Paraná: Formações Pirambóia e Botucatu. Em: Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo. Roteiro de Excursão. São Paulo: SBG, 1992, v.2, 19p.
- Cavicchia M.E. (2007). Desenvolvimento de Modelo Numérico Para Gerenciamento de Recursos Hídricos Subterrâneos na Área do Projecto Piloto de Ribeirão Preto. Master Thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 169p.
- CETESB - Companhia De Tecnologia De Saneamento Ambiental (1997). Uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. CETESB, São Paulo. 48p.
- Corrêa U. (1995). Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo. MSc, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 107 p.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica; IG – Instituto Geológico; IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e CPRM (2005) – Serviço Geológico do Brasil, 2005. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. (1974). Estudo de águas subterrâneas – Região Administrativa 6.- Ribeirão Preto. DAEE, São Paulo, v.4.
- Domenico, P. A., (1972). Concepts and Models in Groundwater Hydrology. McGraw-Hill, New York, USA.



- Guido, M. (2004). Grundwasserbewirtschaftung mittels eines dreidimensionalen numerischen Grundwassermodells im Raum Ribeirão Preto. Diplomarbeit im Fachgebiet Hydrogeologie, Technische Universität Berlin ([www.hydrogeologie.tu-berlin.de](http://www.hydrogeologie.tu-berlin.de)).
- Iritani, M. A. and Hirata, R. (2006). Modelo conceitual preliminar de circulação de água subterrânea no Aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. Artigo no XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Curitiba – PR.
- Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill, and M.G. McDonald, 2000: MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process: United States Geological Survey Open-File Report 00 92, 121 p.
- IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1993). Geologia das Folhas Campinas (SF.23-Y-A) e Ribeirão Preto (SF.23-V-C) Rel. 31.7223. São Paulo, Brasil.
- IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2000). Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Pardo – Relatório Zero. Relatório elaborado para o Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo – CBH-PARDO.
- Massoli M. (2007). Caracterização litofaciológica das formações Pirambóia e Botucatu, em subsuperfície, no município de Ribeirão Preto (SP), e sua aplicação na prospecção de águas subterrâneas. Tesis de Doctorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil.
- Monteiro, R. C. (2003). Estimativa espaço temporal da superfície potenciométrica do Sistema Aquífero Guaraní na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, SP – Brasil.
- Montenegro, A. A.; Righetto, A. M. and Sinelli, O. (1988). Modelação do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto. Anais 5 o Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, São Paulo. P32 – 41.
- Montenegro, A. A. (1990). Modelação matemática do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto – SP. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP – Brasil.



- Rabelo, J. (2005). Desenvolvimento de modelo numérico para avaliar a recarga do Aqüífero Guaraní na sua região de afloramento no Estado de São Paulo. Relatório Científico para a FAPESP. Processo nº 02/12836-1.
- Peaceman, D.W. (1983). Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation with nonsquare gridblocks and anisotropic permeability, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(3), pp. 531-543.
- Pompêo, C.A. (1990). Balanço hídrico da zona não-saturado do solo na bacia do Ribeirão o Onça (SP). Tese de Doutorado, SHS-EESC-USP.
- SG-SAG – Secretaria Geral do Projeto Sistema Aqüífero Guaraní. Disponível em: <[www.sg-guarani.org/index/site/sistema\\_acuifero/sa001.php](http://www.sg-guarani.org/index/site/sistema_acuifero/sa001.php)>. Acesso em: 2006.
- SG-SAG – Secretaria Geral do Projeto Sistema Aqüífero Guaraní. Disponível em: <[www.sg-guarani.org](http://www.sg-guarani.org)>. Acesso em: 2007.
- SIAGAS – Sistema de Informação de Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://siagas.cprm.gov.br/wellshow/indice.asp?w=800&h=600>>. Acesso em: 2006.
- Sinelli, O. and Wernick, E. (1970). Análise estrutural geomorfológica. Notícias Geomorfológicas. Campinas – SP, 10 (20). P 39 – 54
- Sinelli O. and Gallo G. (1980). Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto, S.P. Revista Bras. Geociências, Vol. 10: 129 – 140.
- SMA – Secretaria do Estado do Meio Ambiente (2004). Gerenciamento de aquíferos – Um exemplo de solução integrada para a criação de áreas de abastecimento público com uso de modelos de sustentabilidade e sistemas avançados de suporte de tecnologia de informação. Relatório 11.04.04, 40p. São Paulo, SP.
- SMA/São Paulo & StMUGV/Baviera, 2004. Sistema de informação para o gerenciamento ambiental dos recursos hídricos subterrâneos na área de afloramento do Aqüífero Guaraní no Estado de São Paulo. Projeto em cooperação com Secretaria de Meio Ambiente, Saúde Pública e Proteção ao Consumidor do Estado da Baviera (Alemanha). São Paulo.
- SNC-Lavalin (2008). Análisis de ensayos hidráulicos en áreas piloto. Informe enviado a la OEA.
- Spitz K., and J. Moreno, 1996: A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York.
- Teissedre J.M.; Sanches J. L.; LOPES, M. F. C. 1982. Geometria e condições de exploração do Aqüífero Botucatú no Estado de São Paulo. Anais 2o Cong. Bras. Águas Subterrâneas, Salvador: 53 – 63.



Wang H.F. and Anderson M.P., (1982). Introduction to Groundwater Modeling. W.H. Freeman and Co.

Wendland E. and Rabelo J.L. (2006). Numerical Model for Recharge Evaluation at the Outcrop Zone of the Guaraní Aquifer System. 10p.

Wendland E., Barreto C. and Gomes L.H. (2007). Water Balance in the Guaraní Aquifer Outcrop Zone Based on Hydrogeologic Monitoring. Journal of Hydrology, 342, 261-269.

Zektser, I.S., and L.G. Everett (editors), 2006: Ground Water Resources of the World and Their Use, National Ground Water Association Press, Westerville, Ohio.