



MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO DEL ÁREA PILOTO ITAPÚA

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**

Preparado por

**Dr. Christopher Neville
Dr. Henri Sangam**



**SNC•LAVALIN
International**

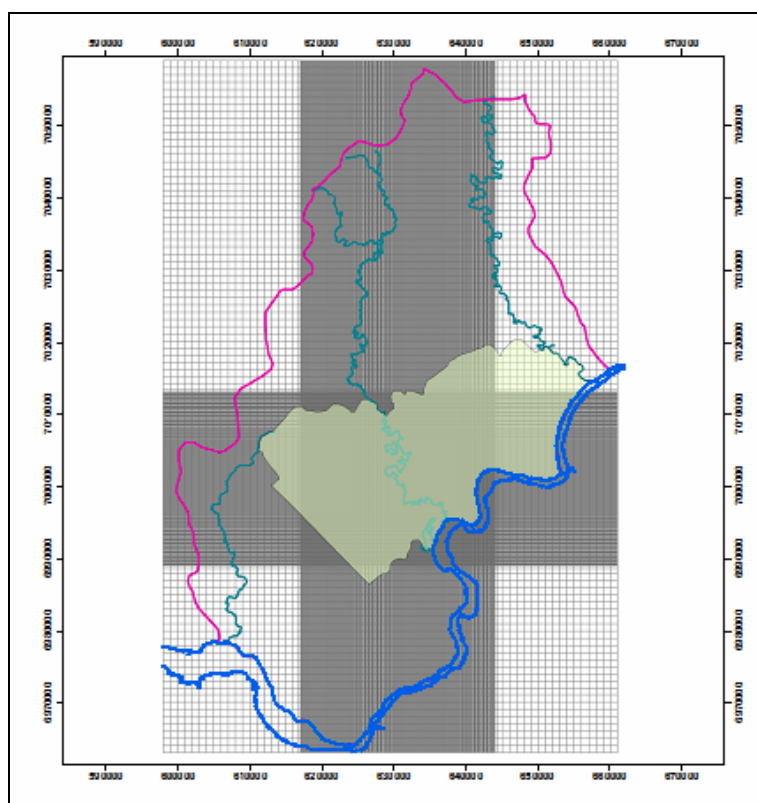
Mayo, 2008



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 Itapúa

MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLOGICO DEL ÁREA PILOTO ITAPÚA



**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
Achylles Bassedas
Alicia Eisenkölbl
Mauricio Santos



Lista de Distribución:

SNC-LAVALIN INTERNATIONAL		
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)
ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS, OEA		
Luiz Amore	Secretario General	(1)
Jorge Santa Cruz	Gerente de Servicios	(1)
EMPRESAS ASOCIADAS		
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 CONTENIDO

1.0	INTRODUCCION.....	10
2.0	MODELO CONCEPTUAL PARA EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA	13
3.0	DESARROLLO DEL MODELO NÚMÉRICO DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	23
3.1	SELECCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	23
3.2	LÍMITES DEL MODELO	24
3.3	DISCRETIZACIÓN DEL MODELO.....	25
3.4	CONDICIONES DE BORDE	31
3.5	FUENTES Y SUMIDEROS	31
3.6	PARÁMETROS Y SELECCIÓN DE MODELO	34
4.0	CALIBRACIÓN DEL MODELO	38
4.1	ESTRATEGIA Y ENFOQUE DE LA CALIBRACIÓN	38
4.2	ESTIMACIÓN INICIAL DE PARÁMETROS	39
4.3	RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.....	41
4.4	EVALUACIÓN DEL MODELO CALIBRADO	48
4.5	ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD.....	53
5.0	VALIDACIÓN DEL MODELO	56
6.0	PREDICCIONES DEL MODELO	68
7.0	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
7.1	PRINCIPALES RESULTADOS DEL ESTUDIO	72
7.2	ELEMENTOS RECOMENDADOS PARA UN PROGRAMA APROPIADO DE MONITOREO Y ENSAYOS.....	73
7.3	RECOMENDACIONES PARA UNA PERFORACIÓN ADICIONAL.....	75

LISTA DE TABLAS

TABLA 1:	PARÁMETROS DEL PAQUETE DE MODELACIÓN MODFLOW PCG2.....	35
TABLA 2:	COMPARACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE AGUA OBSERVADOS Y CALCULADOS	42
TABLA 3:	BALANCE DE AGUA PARA EL MODELO CALIBRADO	50
TABLA 4:	ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD DEL MODELO	53
TABLA 5:	PREDICCIÓN DEL BALANCE HÍDRICO PARA LA REPRESA PINDO-Í	71



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDIO DEL MODELO	12
FIGURA 2A. MODELO CONCEPTUAL - UBICACIÓN DE SECCIÓN TRANSVERSAL	15
FIGURA 2B. MODELO CONCEPTUAL - SECCIÓN TRANSVERSAL HIDROESTRATIGRÁFICA	16
FIGURA 3. UBICACIÓN DE POZOS EN CERCANÍAS AL ÁREA DE ESTUDIO	17
FIGURA 4. CORRELACIÓN ENTRE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA Y ELEVACIONES DE LA SUPERFICIE DEL SUELO	18
FIGURA 5. ELEVACIONES REGIONALES INTERPRETADAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA	19
FIGURA 6. UBICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES GEOLÓGICAS	20
FIGURA 7. SECCIÓN TRANSVERSAL NORTE-SUR	21
FIGURA 8. SECCIÓN TRANSVERSAL ESTE-OESTE	22
FIGURA 9. CUADRÍCULA DE DIFERENCIAS FINITAS DEL MODELO	27
FIGURA 10. CUADRÍCULA DE DIFERENCIAS FINITAS DEL MODELO, ÁREA PILOTO ITAPÚA	28
FIGURA 11. CAPAS DEL MODELO – SECCIÓN TRANSVERSAL NORTE-SUR	29
FIGURA 12. CAPAS DEL MODELO – SECCIÓN TRANSVERSAL ESTE-OESTE	30
FIGURA 13. CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO	33
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE LA RECARGA	36
FIGURA 15. UBICACIÓN DE LOS POZOS DE BOMBEO	37
FIGURA 16. UBICACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE CALIBRACIÓN	40
FIGURA 17. COMPARACIÓN ENTRE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA OBSERVADOS Y CALCULADOS	45
FIGURA 18. VALORES RESIDUALES DEL MODELO	46
FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE LOS RESIDUALES DEL MODELO	47
FIGURA 20. ELEVACIONES CALCULADAS DEL NIVEL FREÁTICO	51
FIGURA 21. NIVELES DE AGUA CALCULADOS EN LA ARENISCA MISIONES	52
FIGURA 22. ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD PARA EL MODELO CALIBRADO	55
FIGURA 23. UBICACIÓN DE POZOS DE ENSAYOS HIDRÁULICOS PARA VALIDACIÓN DEL MODELO	58
FIGURA 24. INFORMACIÓN DEL ENSAYO HIDRÁULICO DE HOHENAU	59
FIGURA 25. INFORMACIÓN DEL ENSAYO HIDRÁULICO DE TRINIDAD	60
FIGURA 26. INFORMACIÓN DEL ENSAYO HIDRÁULICO DE JESÚS	61
FIGURA 27. INFORMACIÓN DEL ENSAYO HIDRÁULICO IT-P0376	62
FIGURA 28. INFORMACIÓN DEL ENSAYO HIDRÁULICO IT-P0027	63
FIGURA 29. EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS NO-LINEALES EN EL ENSAYO ESCALANDO EN TRINIDAD	66
FIGURA 30. COMPARACIÓN ENTRE LOS ABATIMIENTOS MÁXIMOS MEDIDOS Y CALCULADOS	67
FIGURA 31. UBICACIÓN DE LA REPRESA PINDO-Í	69
FIGURA 32. NIVELES DE AGUA CALCULADOS EN LA ARENISCA MISIONES CON LA REPRESA PINDO-Í	70



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.



ABSTRACT

This report describes the development and application of a groundwater model of the Itapúa pilot area. The model has been developed to synthesize the data collected and the interpretations developed for the study area. The calibrated model provides a relatively good match to observed water levels, and the inferred parameters are consistent with parameters estimated from a previous regional analysis. The model has been tested by simulating four pumping tests conducted in the Itapúa pilot area. The potential utility of the calibrated groundwater model for predictive purposes is demonstrated by its application for the estimation of the potential effects of the construction of a dam on the Paraná River near Corpus Christi. The model developed for this study may also assist in the future for evaluations of the potential effects of groundwater resources developments and for the evaluation of the potential local-scales effects of agricultural development on groundwater quality.

The report includes recommendations for the development of a long-term monitoring strategy and data collection program. Elements of an appropriate monitoring and testing program are presented in the report. Together, these elements would serve to better constrain both the analysis of current conditions and the predictions for alternative scenarios. Assuming that sufficient resources are available for the drilling of one well, it is recommend that the well be installed at a location in the vicinity of E623000 m, N698000 m. The report includes an explanation of the factors considered in identifying this location as an appropriate area for additional investigation.

Este informe describe el desarrollo y aplicación de un modelo de agua subterránea para el área piloto Itapúa. El modelo fue desarrollado sintetizando los datos colectados y las interpretaciones desarrolladas para el área piloto. El modelo calibrado provee una representación muy cercana de los valores observados del nivel de agua y los parámetros inferidos son consistentes con los parámetros estimados según un análisis regional previo. El modelo fue probado simulando cuatro ensayos hidráulicos de bombeo realizados en el área Itapúa. El uso potencial del modelo de agua subterráneo calibrado para uso de predicciones, se demostró por su aplicación para la estimación de los efectos potenciales de la construcción de la presa Corpus Christi cerca del Río Paraná. El modelo desarrollado para este estudio puede también servir en el futuro para evaluar efectos potenciales, en el desarrollo del recurso hídrico subterráneo, así como para la evaluación de los efectos potenciales producidos por el desarrollo agrícola local sobre la calidad del agua subterránea.

El informe incluye recomendaciones para el desarrollo de una estrategia de monitoreo a largo plazo y un programa de colecta de datos, presentando los elementos apropiados para un programa de monitoreo. Dichos elementos servirán para realizar un mejor análisis de condiciones actuales y de predicciones para escenarios alternativos. Asumiendo que existen suficientes recursos para realizar la perforación de un pozo, se recomienda que el pozo se instale en una localidad cercana a las coordenadas E623000 m, N698000 m. El informe incluye una explicación de los factores considerados para identificar esta ubicación como un área apropiada para investigación adicional.



RESUMEN EJECUTIVO

Se desarrolló un modelo numérico hidrogeológico del área piloto Itapúa sintetizando los datos colectados y las interpretaciones desarrolladas para el área piloto. El objetivo específico del modelo fue desarrollar, calibrar y probar el modelo para el área piloto Itapúa. El modelo calibrado provee una representación muy cercana de los valores observados del nivel de agua y los parámetros inferidos son consistentes con los parámetros estimados según un análisis regional previo.

El modelo fue probado simulando cuatro ensayos hidráulicos realizados en el área piloto Itapúa. Los cambios de nivel de agua calculados representa las condiciones generales de las observaciones. Los resultados de los ensayos hidráulicos demuestran la complejidad de las propiedades de las areniscas de la Formación Misiones.

El modelo fue probado simulando cuatro ensayos hidráulicos de bombeo realizados en el área Itapúa. El uso potencial del modelo de agua subterráneo calibrado para uso de predicciones, se demostró por su aplicación para la estimación de los efectos potenciales de la construcción de la presa Corpus Christi en el Río Paraná.

El modelo desarrollado para este estudio puede también servir en el futuro para evaluar efectos potenciales, en el desarrollo del recurso hídrico subterráneo, así como para la evaluación de los efectos potenciales producidos por el desarrollo agrícola local sobre la calidad del agua subterránea.

El área piloto Itapúa realiza una explotación del agua subterránea relativamente baja. Anticipando el incremento del desarrollo potencial de uso de agua subterránea, se recomienda que se considere la elaboración de una estrategia de monitoreo a largo plazo para colecta de datos de pozos existentes. Este informe presenta elementos para crear un programa apropiado de monitoreo y ensayos del acuífero. Estos elementos servirán para realizar análisis de las condiciones actuales y realizar predicciones de escenarios alternativos.

La información que podrá obtenerse de perforaciones adicionales para completar falta de datos y para confirmar la validez del modelo calibrado sería muy valiosa. Asumiendo que existen suficientes recursos para realizar la perforación de un pozo, se recomienda que el pozo se instale en una localidad cercana a las coordenadas E623000 m, N698000 m. El informe incluye una explicación de los factores considerados para identificar esta ubicación como un área apropiada para investigación adicional.



1.0 INTRODUCCION

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.

El presente informe presenta el Modelo Numérico Hidrogeológico y los escenarios de simulación para el área piloto Itapúa, Paraguay, según los requerimientos establecidos por la OEA, para la evaluación del Sistema Acuífero Guaraní a escala local.

Este estudio es liderado por SNC-Lavalin, en asociación con GEODATOS S.R.L.; PROINSA Proyectos de Ingeniería S.A. (Proinsa) y P&T Consultora S.R.L., LCV S.R.L., firmas de Argentina; DH Perforação de Poços Ltda (DH) de Brasil. La firma S.S. Papadopoulos & Associates, Inc. (SSPA) de Canadá colaboró en el desarrollo y ejecución del presente modelo numérico. Cabe mencionar que la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) colaboró con los análisis de isótopos.

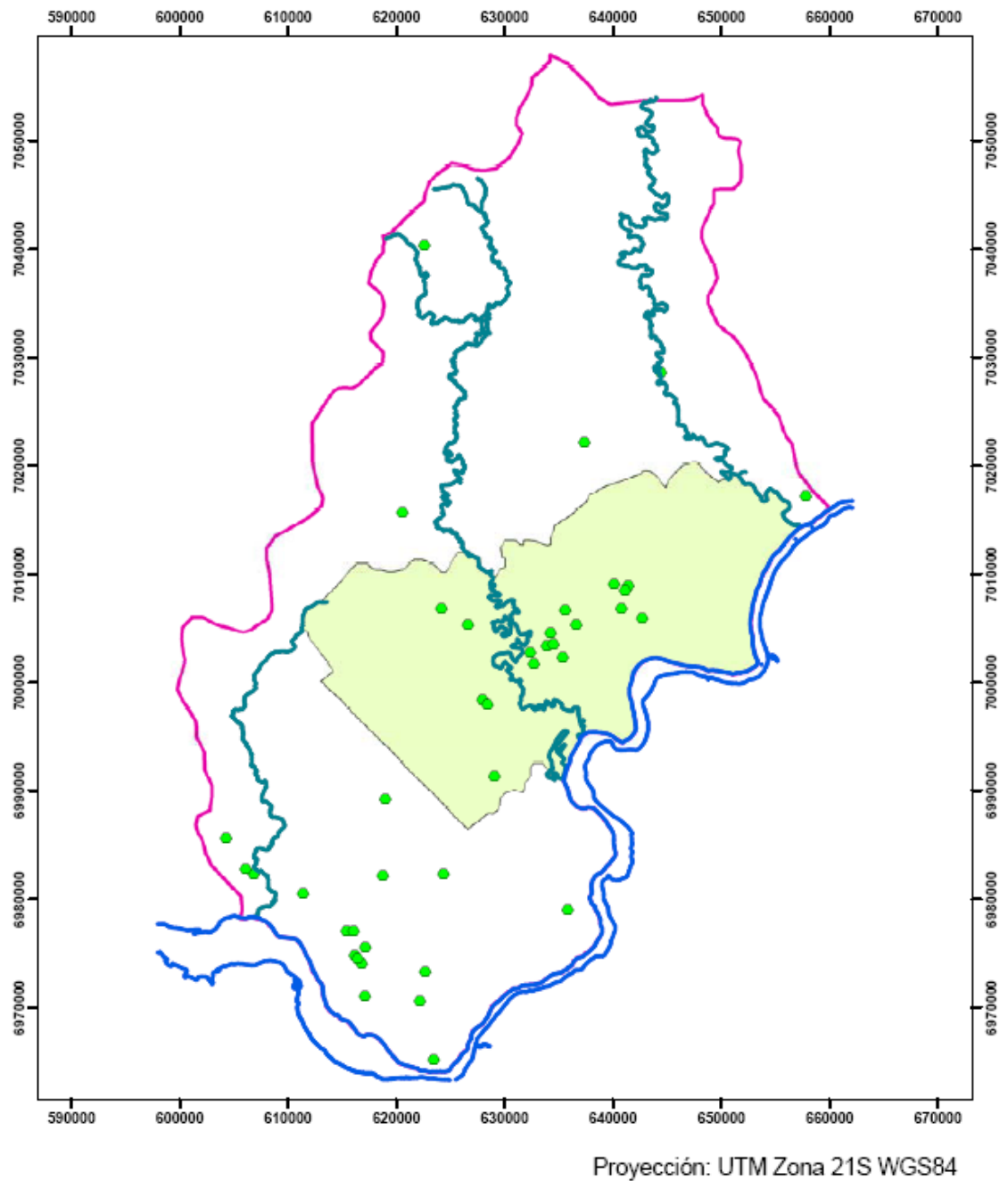
El modelo numérico hidrogeológico tiene el fin de simular el flujo de agua subterránea en la cuenca que contiene el área de estudio. Este informe presenta la metodología seguida para la ejecución del modelo y los resultados de simulación.

En la Figura 1 se muestra el área piloto Itapúa y su entorno. El área sombreada en el centro señala los límites del área piloto estudiada. Los límites del área de análisis son significativamente mayores; estos límites corresponden al río Paraná en el este y sur, y a la línea exterior de color magenta en los otros lugares. Estos límites corresponden a los supuestos de la cuenca que contiene el área piloto Itapúa. El área de estudio tiene aproximadamente 62 km de ancho en la dirección este-oeste, y 96 km de largo en la dirección norte- sur.

El modelo de agua subterránea de Itapúa se ha elaborado para sintetizar la información recolectada y las interpretaciones analizadas durante el estudio del proyecto piloto Itapúa. El objetivo específico de la modelación es desarrollar, calibrar y probar un modelo numérico de agua subterránea para el área de estudio Itapúa. El modelo también se aplicará para



predecir los efectos potenciales por la construcción de una represa en el río Paraná, cerca de Corpus Christi. El modelo desarrollado para este estudio puede servir en el futuro como una plataforma para analizar los efectos potenciales de los desarrollos de recursos hídricos subterráneos y para la evaluación de los impactos potenciales a escala regional sobre la calidad del agua subterránea, debido a los desarrollos agrícolas.



Legenda

- Área piloto Itapúa
- Límites área activa modelo
- Rio Paraná
- Tributario rio Paraná
- Pozos

Figura 1. Área de estudio del Modelo



**SNC•LAVALIN
International**





2.0 MODELO CONCEPTUAL PARA EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

En la Figura 2 se muestra un modelo conceptual del flujo de agua subterránea en el área piloto Itapúa. La primera parte de la figura muestra la ubicación de una sección transversal a través del área del modelo, aproximadamente a lo largo de la dirección del flujo de agua subterránea. La segunda parte de la figura 2 muestra las elevaciones de las principales unidades hidroestratigráficas. En el área piloto Itapúa, el Sistema Acuífero Guaraní corresponde a la arenisca Misiones.

En el área de estudio, la arenisca pérmica con una permeabilidad relativamente baja yace bajo la arenisca Misiones. Basándose en un análisis a gran escala, Vassolo (*Modelos conceptual y numérico de la zona del Proyecto SAG-PY*) dedujo que la conductividad hidráulica horizontal de la arenisca pérmica era más baja que la arenisca Misiones por un factor de 6000. Para el presente análisis, se asumió que el flujo de agua subterránea en la arenisca pérmica es insignificante.

Como se presenta en la Figura 2a, en algunas partes del área de estudio, el basalto yace sobre la arenisca Misiones. En otras partes no hay presencia de basalto y la arenisca Misiones se encuentra en la superficie o tiene una cubierta de cuaternario reciente relativamente delgada. Donde está presente, se asumió que la parte más alta del basalto es menos permeable que la arenisca Misiones, y se asumió que transmite una tasa reducida de recarga a través de una red de fracturas verticales. En la Figura 2b se muestran las elevaciones del nivel freático y de la superficie potenciométrica de la arenisca Misiones calculadas con el modelo numérico desarrollado para este estudio. El nivel freático y la superficie potenciométrica de la arenisca Misiones coinciden en áreas donde el basalto está ausente.

El primer paso en el análisis es el desarrollo de un mapa preliminar de los niveles de agua subterránea en toda la cuenca hidrográfica. Los círculos verdes en la Figura 1 indican la ubicación de los pozos para los cuales se tiene información sobre los niveles de agua ya sea en el basalto o en la arenisca Misiones. Como se presenta en esa figura, los pozos son relativamente escasos. Para desarrollar una interpretación regional del flujo del agua subterránea, se tomaron en cuenta los niveles de agua en los pozos dentro y fuera de los límites supuestos de la cuenca hidrográfica. En la Figura 3 se muestra la ubicación de todos los pozos para los cuales existe información sobre el nivel de agua.

Las elevaciones regionales del agua subterránea se interpolaron sobre toda el área de estudio con el método Bayesiano kriging (TRIPOL; van Tonder y otros, 1996). Como se indica en la Figura 4, los niveles regionales de agua subterránea se correlacionan



estrechamente con la elevación de la superficie del terreno. En promedio, el nivel del agua subterránea está 19 m por debajo de la superficie del terreno. La correlación entre los niveles de agua subterránea y las elevaciones de la superficie del terreno representa una tendencia incierta que suplementa el kriging convencional de la información disponible sobre el nivel de agua subterránea. En la Figura 5 se presentan los resultados de la interpolación. Las elevaciones representan el nivel aproximado del nivel freático. El basalto está ausente en el centro del área de estudio Itapúa; por ende, en esos lugares el nivel freático también representa la superficie potenciométrica de la arenisca Misiones.

La estratigrafía en el área de estudio Itapúa consiste en la siguiente secuencia:

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

En la Figura 6 se observa la ubicación de las dos secciones transversales. En la Figura 7 se muestra una sección transversal norte- sur, y en la Figura 8 se muestra una sección transversal en dirección este-oeste. Como se ve en estas Figuras, en el área de estudio el cuaternario reciente es delgado. El basalto también es delgado, y está ausente en el centro del modelo.

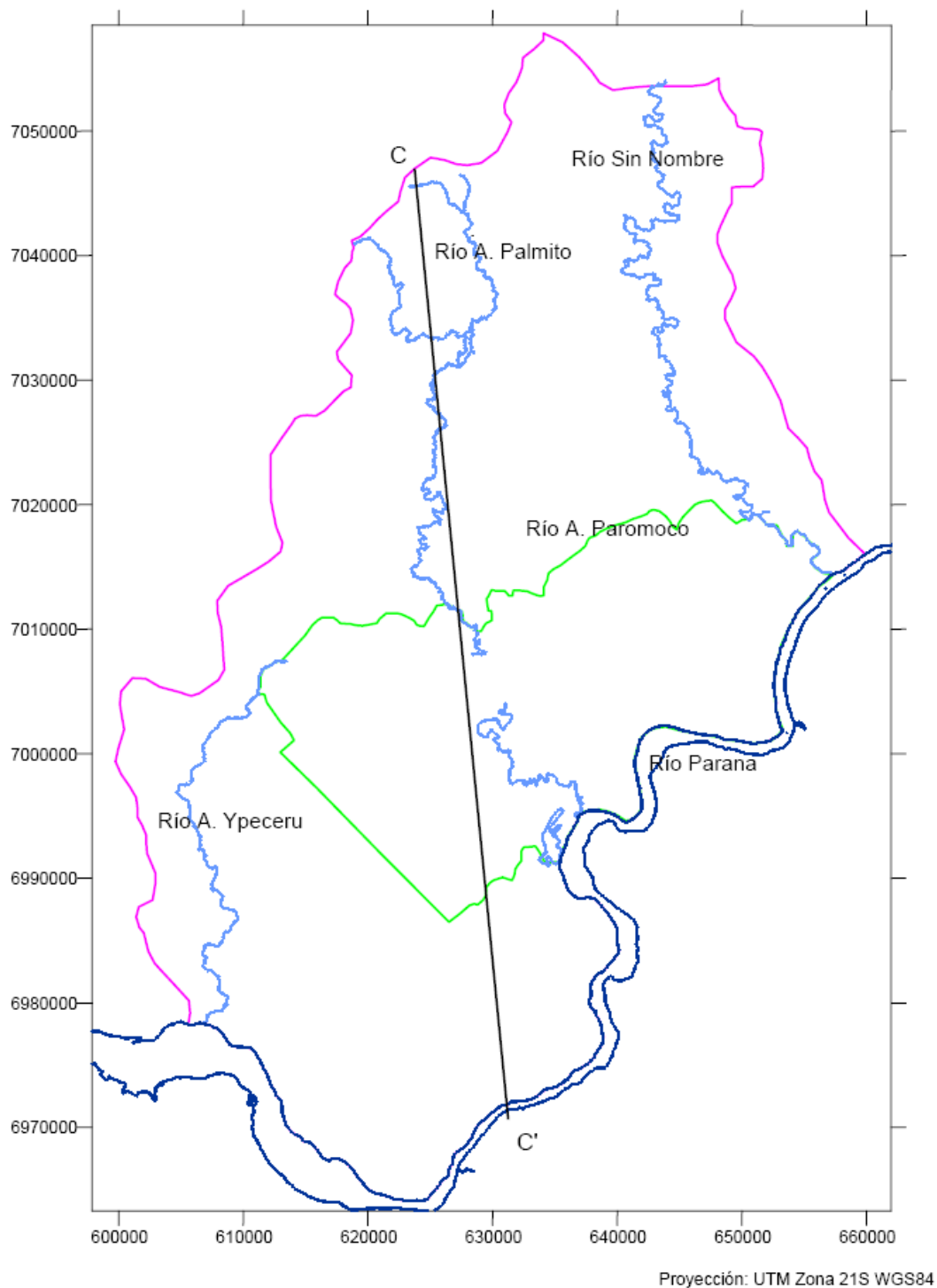


Figura 2a. Modelo conceptual - ubicación de sección transversal

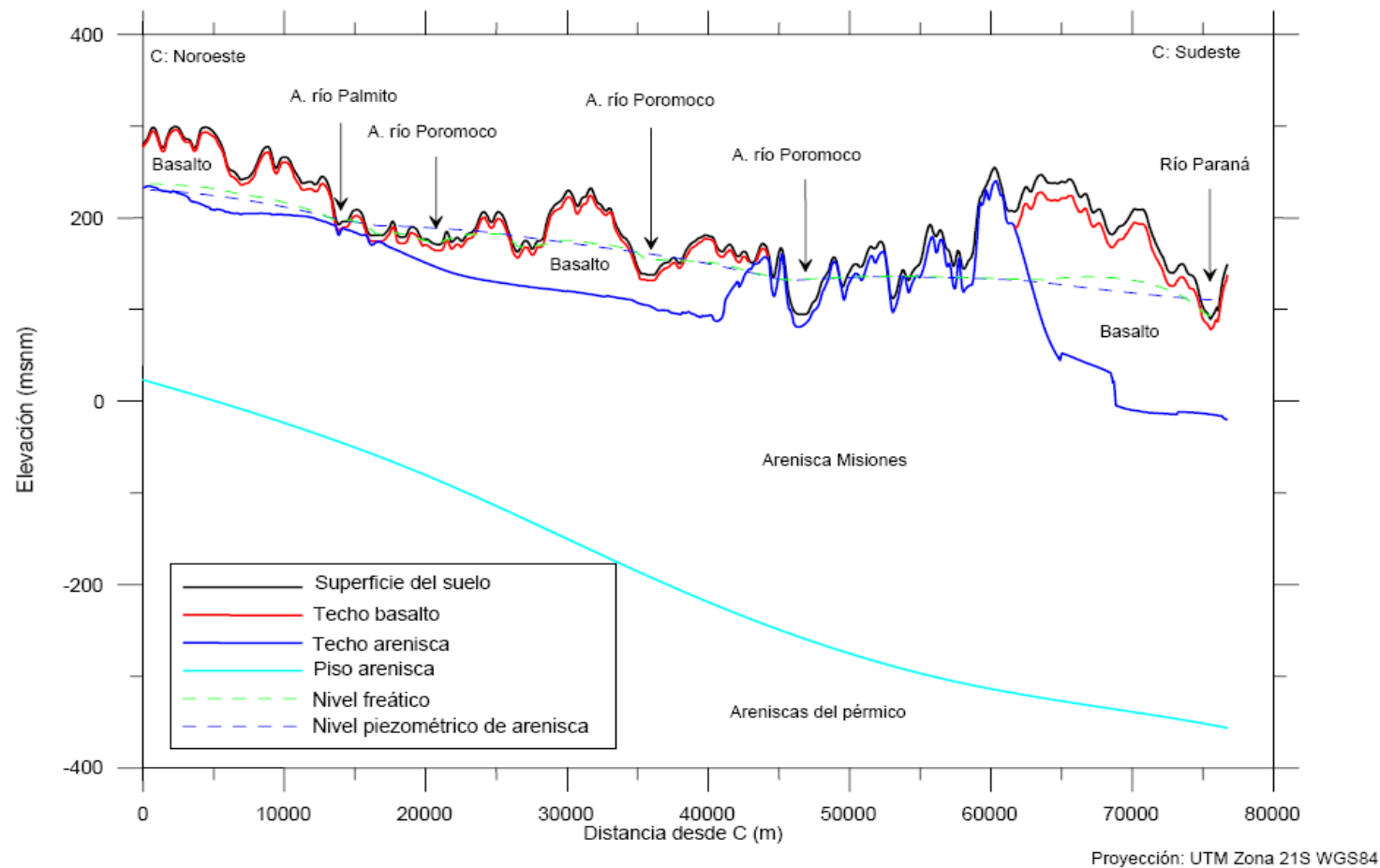


Figura 2b. Modelo conceptual - Sección transversal hidroestratigráfica

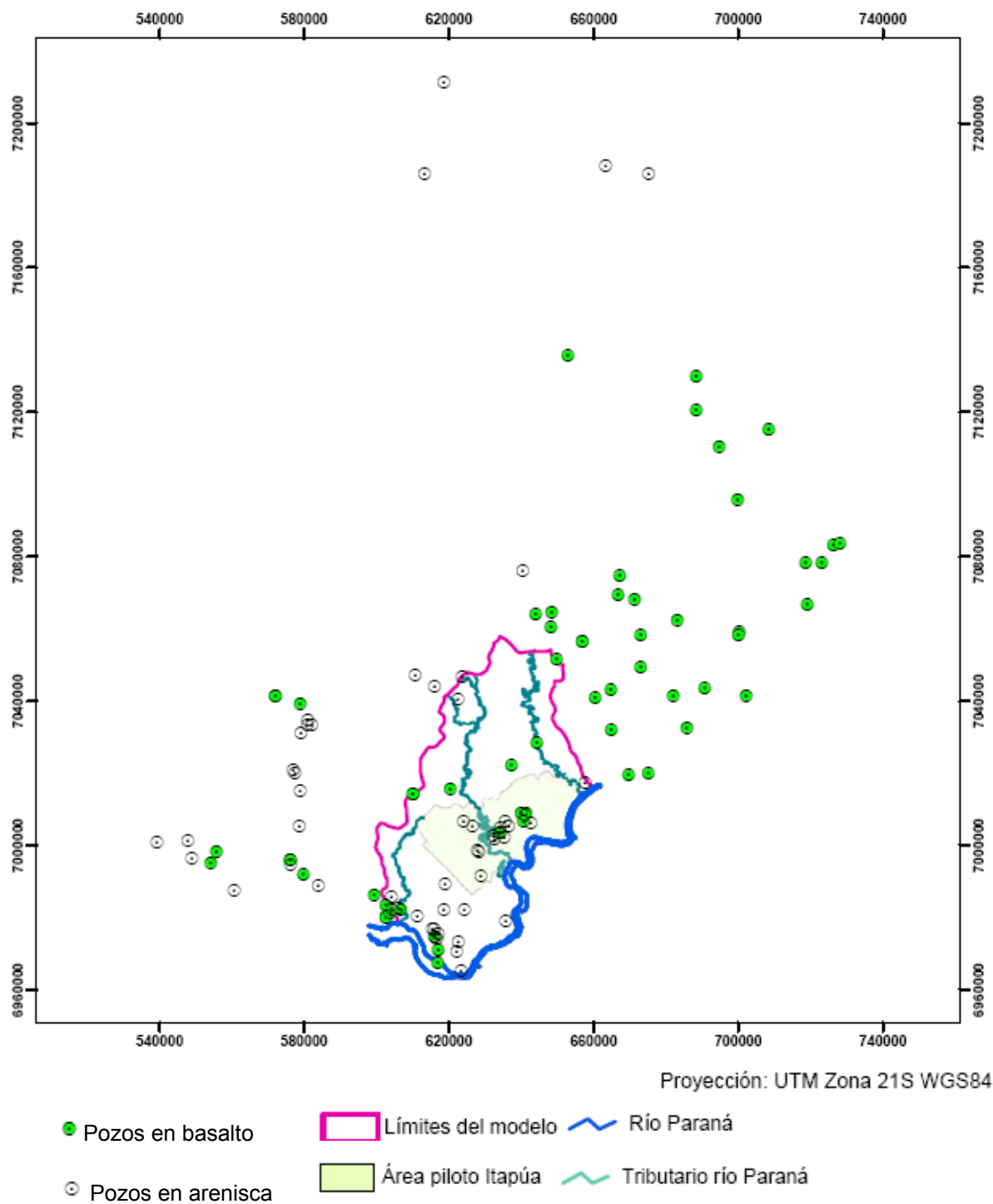


Figura 3. Ubicación de pozos en cercanía al área de estudio

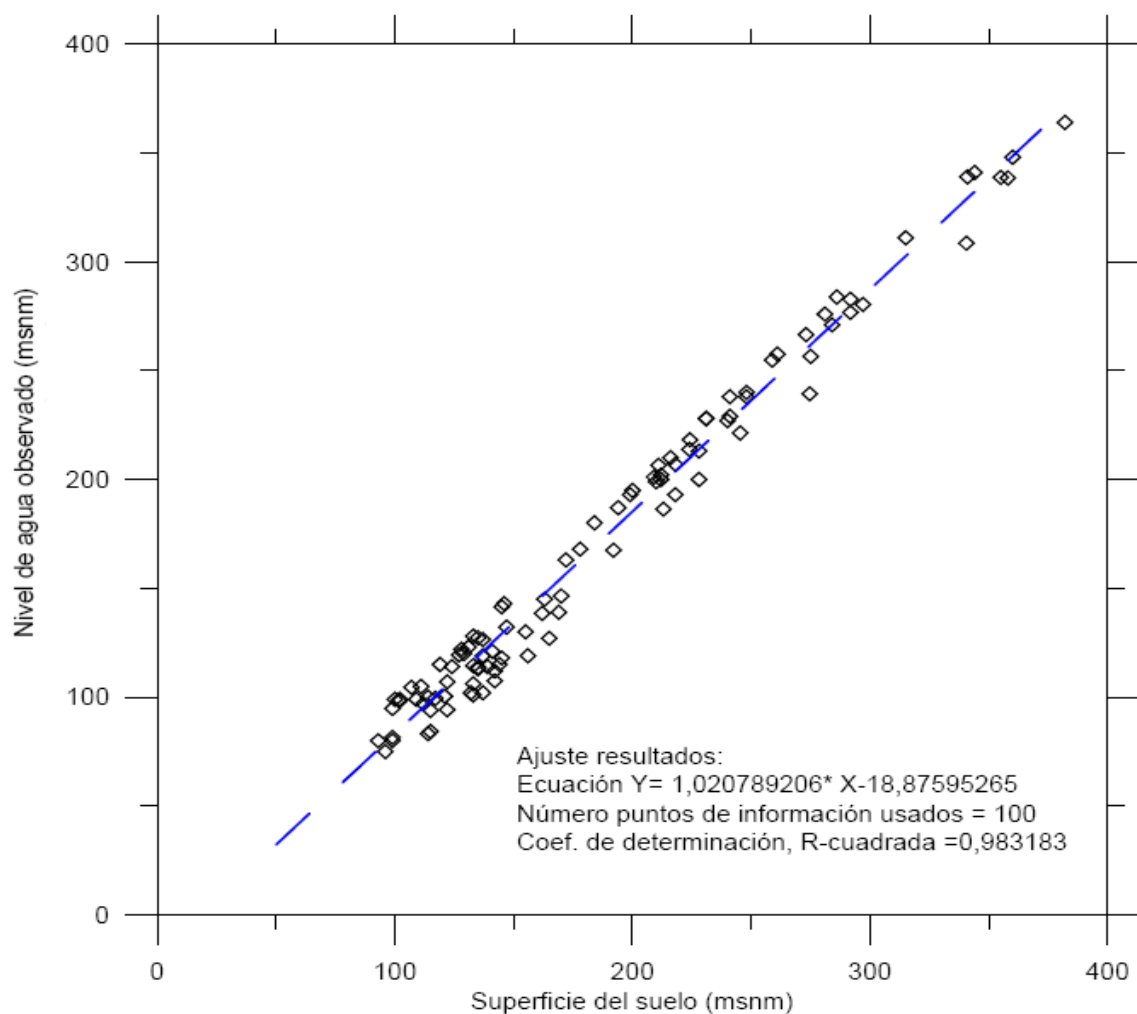


Figura 4. Correlación entre niveles de agua subterránea y elevaciones de la superficie del suelo.

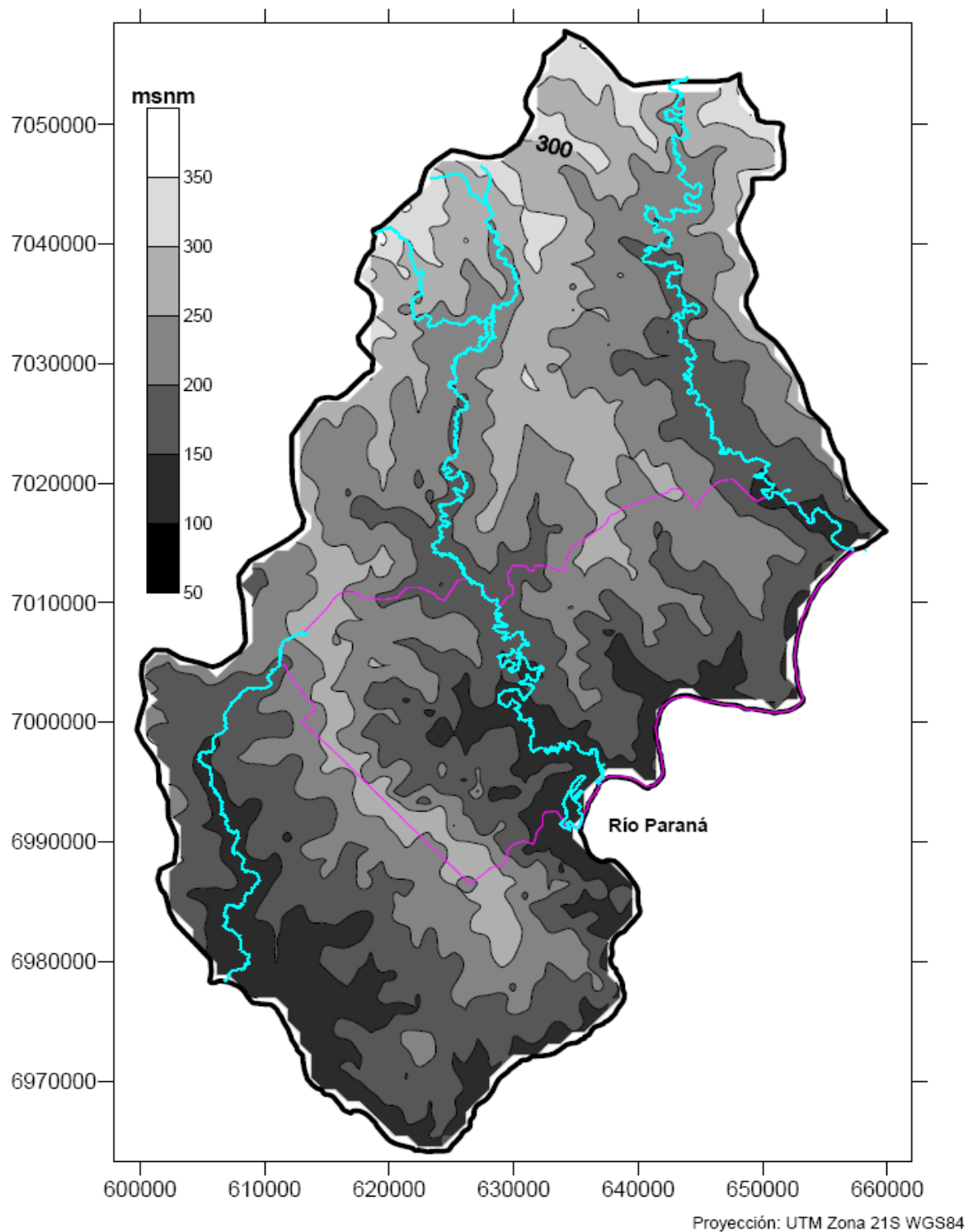


Figura 5. Elevaciones regionales interpretadas de agua subterránea

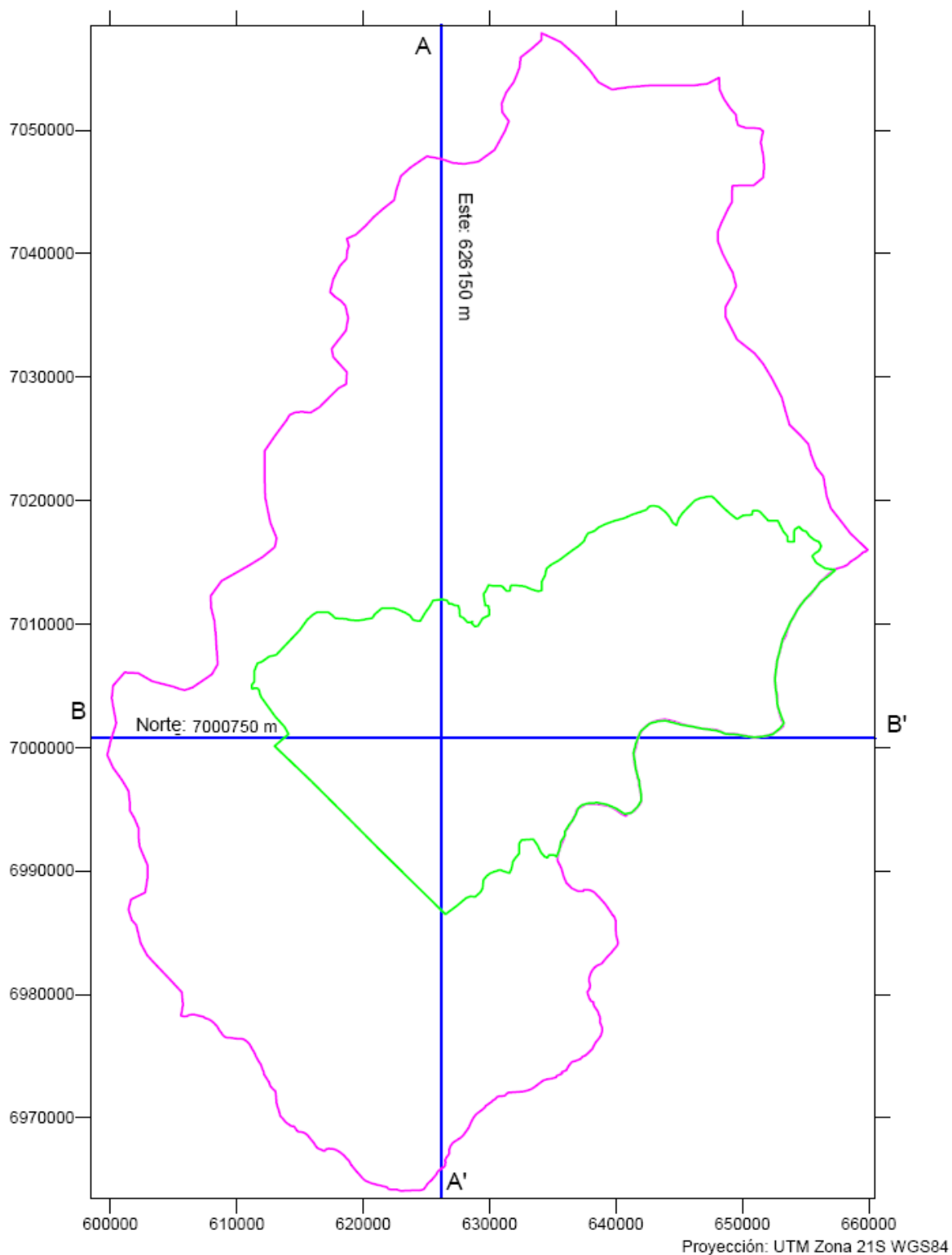


Figura 6. Ubicación de secciones transversales geológicas

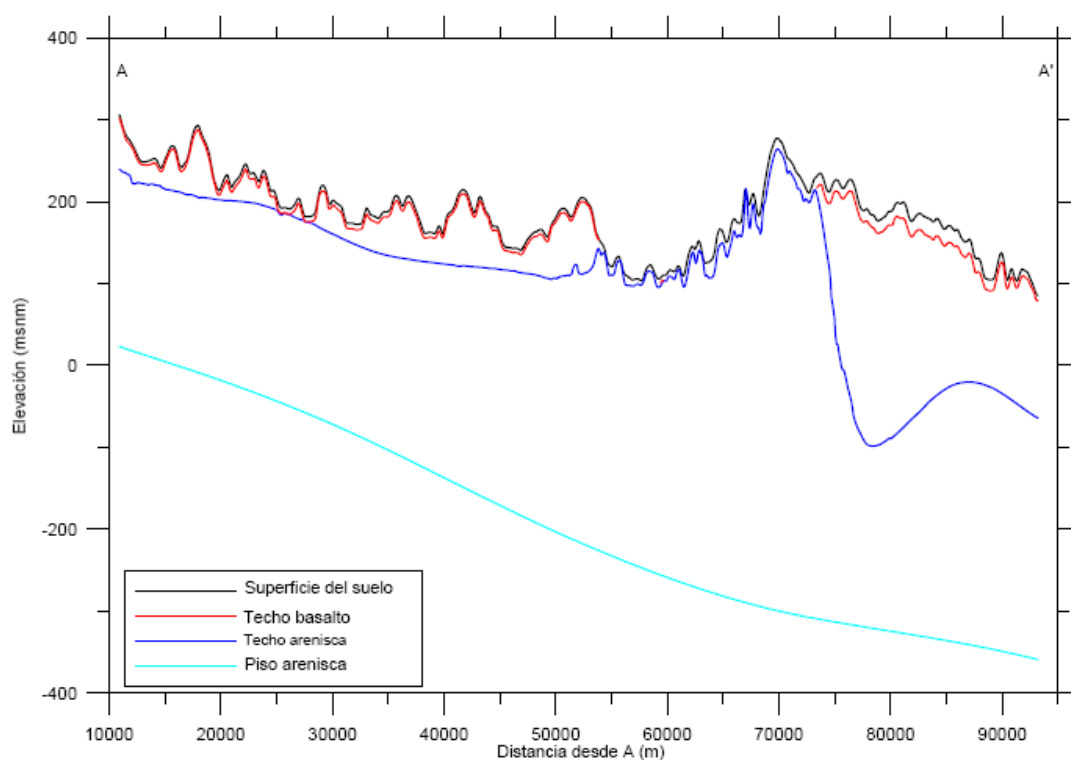


Figura 7. Sección transversal Norte-Sur

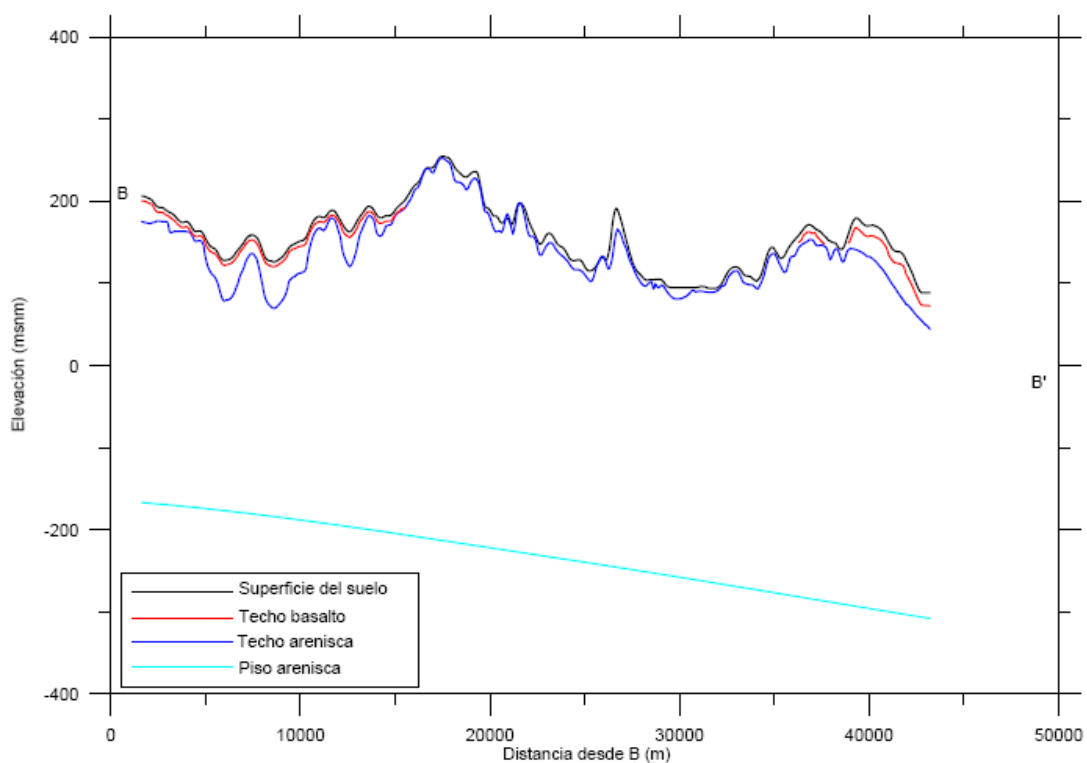


Figura 8. Sección transversal Este-oeste



3.0 DESARROLLO DEL MODELO NÚMÉRICO DE AGUA SUBTERRÁNEA

3.1 Selección del modelo numérico

El modelo numérico de flujo de agua subterránea se desarrolló utilizando el simulador USGS tridimensional de agua subterránea, MODFLOW-2000 (Harbaugh y otros, 2000). Se escogió MODFLOW para esta aplicación porque ofrece flexibilidad y generalidad al representar la estructura estratigráfica tridimensional, las condiciones de límite, y las fuentes y sumideros. La fuente abierta y la estructura modular del código han hecho posible que los investigadores enriquezcan su funcionalidad. Desde que se estrenó la primera versión en 1988, se han desarrollado muchos paquetes disponibles al público que amplían la aplicación del MODFLOW para que simule condiciones y procesos hidrogeológicos complejos, incluyendo la interacción del agua subterránea y el agua superficial, tales como interacciones con ríos y arroyos, manejo óptimo del agua subterránea, cálculo de parámetros, cálculo de la trayectoria del flujo de agua subterránea y la migración de contaminantes. MODFLOW es el código de modelación de flujo de agua subterránea más utilizado en el mundo y cuenta con una amplia aceptación en Norte América y entre las comunidades de investigadores internacionales y consultores de agua subterránea (Anderson y Woessner, 1992).

El modelo numérico se desarrolla dentro de la interfaz gráfica de usuario, Groundwater Vistas (Environmental Simulations Inc., 1998). La interfaz Groundwater Vistas proporciona un marco gráfico fácil de utilizar para la visualización de los parámetros y cálculos del modelo.

MODFLOW puede simular un flujo en régimen permanente y en régimen transitorio dentro de un sistema de flujo de forma irregular. Las capas del acuífero pueden estar confinadas o no, o pueden ser una combinación de ambas. Se puede simular el flujo desde las fuentes o sumideros tales como pozos, recargas por infiltraciones de precipitaciones, evapotranspiración, drenajes, e interacciones acuífero-río. Las conductividades hidráulicas o transmisividades pueden variar espacialmente y ser anisotrópicas. Se pueden asignar coeficientes de almacenamiento para representar los procesos de confinamiento o no confinamiento, y pueden ser heterogéneos. Se pueden simular condiciones de borde para cargas prescritas, flujo específico y flujo dependiente de la carga.

MODFLOW está diseñado para simular sistemas acuíferos sujetos a las siguientes condiciones generales:



- El medio poroso es saturado;
- Aplica la ley de Darcy;
- La densidad del agua subterránea es constante; y
- Los sentidos principales de la conductividad hidráulica horizontal o transmisividad son paralelos a los ejes de la cuadrícula del modelo.

Cada una de estas condiciones se cumple en el análisis del flujo de agua subterránea en el área de estudio:

- El modelo toma en cuenta los sedimentos del cuaternario reciente sobrecarga y la roca firme meteorizada debajo del nivel freático;
- Las velocidades de los fluidos son relativamente bajas;
- El agua subterránea en el cuaternario reciente es agua dulce; y
- Se asume que las propiedades hidráulicas del cuaternario reciente son isotrópicas en la dirección horizontal y anisotrópicas en la dirección vertical.

3.2 Límites del modelo

En la Figura 1 se muestran los límites del área activa del modelo.

La delineación de los límites del modelo es muy importante ya que establece la extensión total del análisis, y cómo se definen las condiciones de borde. El establecimiento de los límites del modelo se basa no solo en el área en cuestión, sino también en la disponibilidad de la información específica del lugar. Para aquellos casos donde hay poca información disponible, se adapta un dominio del modelo más grande para extender los límites del modelo hasta límites naturales tales como las divisorias de aguas y los cuerpos regionales de agua superficial. Aunque el énfasis es en el área inmediata alrededor de los pozos en el área de estudio Itapúa, el dominio del modelo se extiende a las divisorias naturales de aguas superficiales. La estrecha relación entre la topografía y el nivel estático del agua subterránea se utiliza para sustentar la suposición de que las divisorias de aguas superficiales y de aguas subterráneas coinciden.



3.3 Discretización del modelo

Discretización Espacial

El dominio del modelo se divide en filas y columnas que colectivamente forman la cuadrícula de diferencias finitas. Se supone que cada celda tiene propiedades hidrogeológicas uniformes. Las propiedades pueden variar entre celdas para representar un acuífero heterogéneo complejo. Lo ideal es tener muchos bloques de cuadrículas para que el modelo sea capaz de representar el contorno de los límites del modelo, las variaciones en las propiedades de los materiales, y resolver los gradientes hidráulicos. Sin embargo, a mayor número de celdas en el modelo mayor son las necesidades informáticas. Debe haber un balance entre los costos informáticos y la densidad de la cuadrícula del modelo.

Para este estudio, se diseñó una cuadrícula del modelo con espaciamiento variable para proporcionar una resolución relativamente alta alrededor de los pozos en el área piloto Itapúa. En la Figura 9 se presenta la cuadrícula de diferencias finitas. La discretización se diseñó para proporcionar una gran cobertura superficial permitiendo detalles adicionales para cálculos más exactos dentro del área de mayor interés. El área de mayor resolución espacial definida para el área piloto Itapúa se indica por medio de un cruciforme en el centro de la Figura 9. Dentro de esta área el espaciamiento de la cuadrícula es de 100 m. Fuera del área piloto Itapúa, se adoptó un espaciamiento uniforme de la cuadrícula de 1.000 m.

En la Figura 10 se presenta una visión mas amplia de la cuadrícula del modelo en las inmediaciones del área piloto Itapúa. Como se indica en esa figura, la discretización espacial es relativamente alta en el área de estudio de Itapúa.

La cuadrícula del modelo contiene un total de 314 filas y 308 columnas. El número total de bloques de la cuadrícula en cada capa del modelo es de 96.712. Los bloques de la cuadrícula que quedan por fuera de los límites del área activa del modelo que se presentan en la Figura 1 no están activos. El número total de bloques activos en cada capa es de 81.855.

El modelo se divide en cuatro capas:

- Capa 1 del modelo: Cuaternario reciente;
- Capas 2 y 3 del modelo: basalto; y



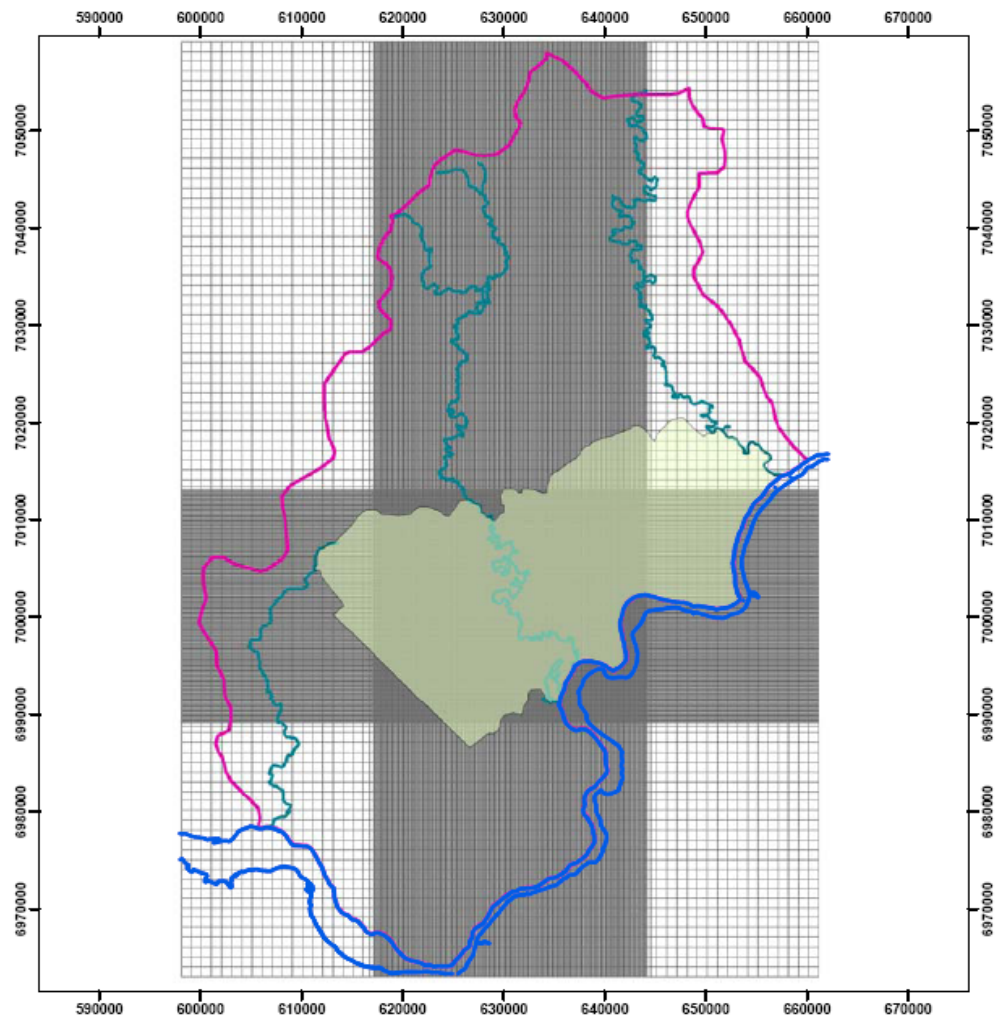
- Capa 4 del modelo: areniscas.

El número total de bloques activos en la cuadrícula del modelo es de 327.420.

Donde no hay basalto, a las capas 2 y 3 del modelo se les asignó un espesor mínimo de 1 m, y las mismas propiedades de las areniscas. Para confirmar la correcta interpretación de las superficies de control en el modelo numérico, las secciones transversales norte-sur y este-oeste extraídas del modelo se presentan en las Figuras 11 y 12. Como se ve en esas figuras, las superficies de control y la interpolación del modelo tienen una coincidencia cercana. Hay pequeñas diferencias en la porción oeste del área del modelo, donde se promediaron elevaciones superiores a los 1.000 m de espaciamiento en la cuadrícula.

Discretización temporal

El análisis se desarrolló para representar las condiciones a largo plazo en el sistema de agua subterránea. Por eso, para este análisis se seleccionó una solución de régimen permanente del flujo de agua subterránea.



Proyección: UTM Zona 21S WGS84

Leyenda

- Límites modelo
- Área piloto Itapúa
- Cuadrícula modelo
- ~ Rio Paraná
- ~ Tributario río Paraná

Figura 9. Cuadrícula de diferencias finitas del modelo

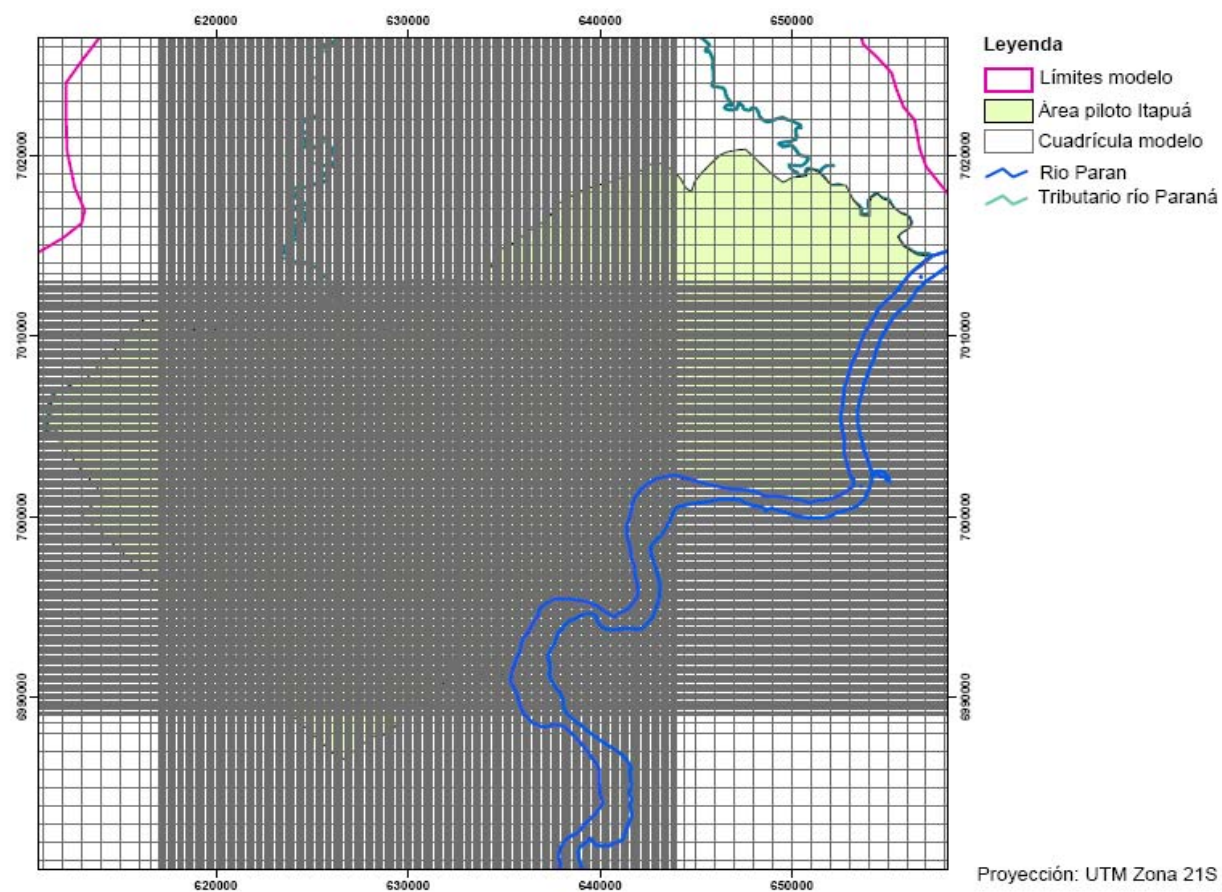


Figura 10. Cuadrícula de diferencias finitas del modelo, área piloto Itapúa

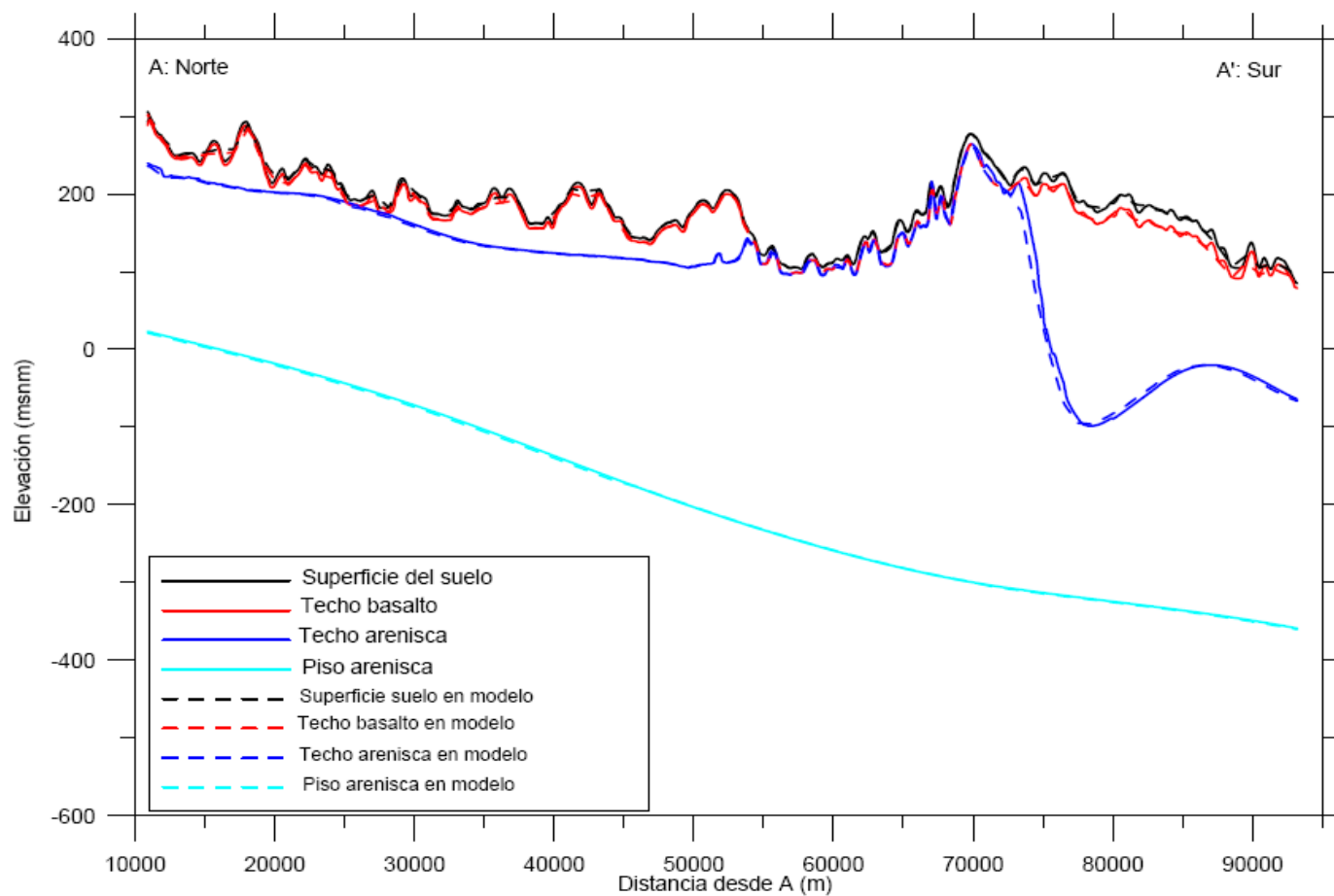


Figura 11. Capas del modelo – Sección transversal Norte-Sur

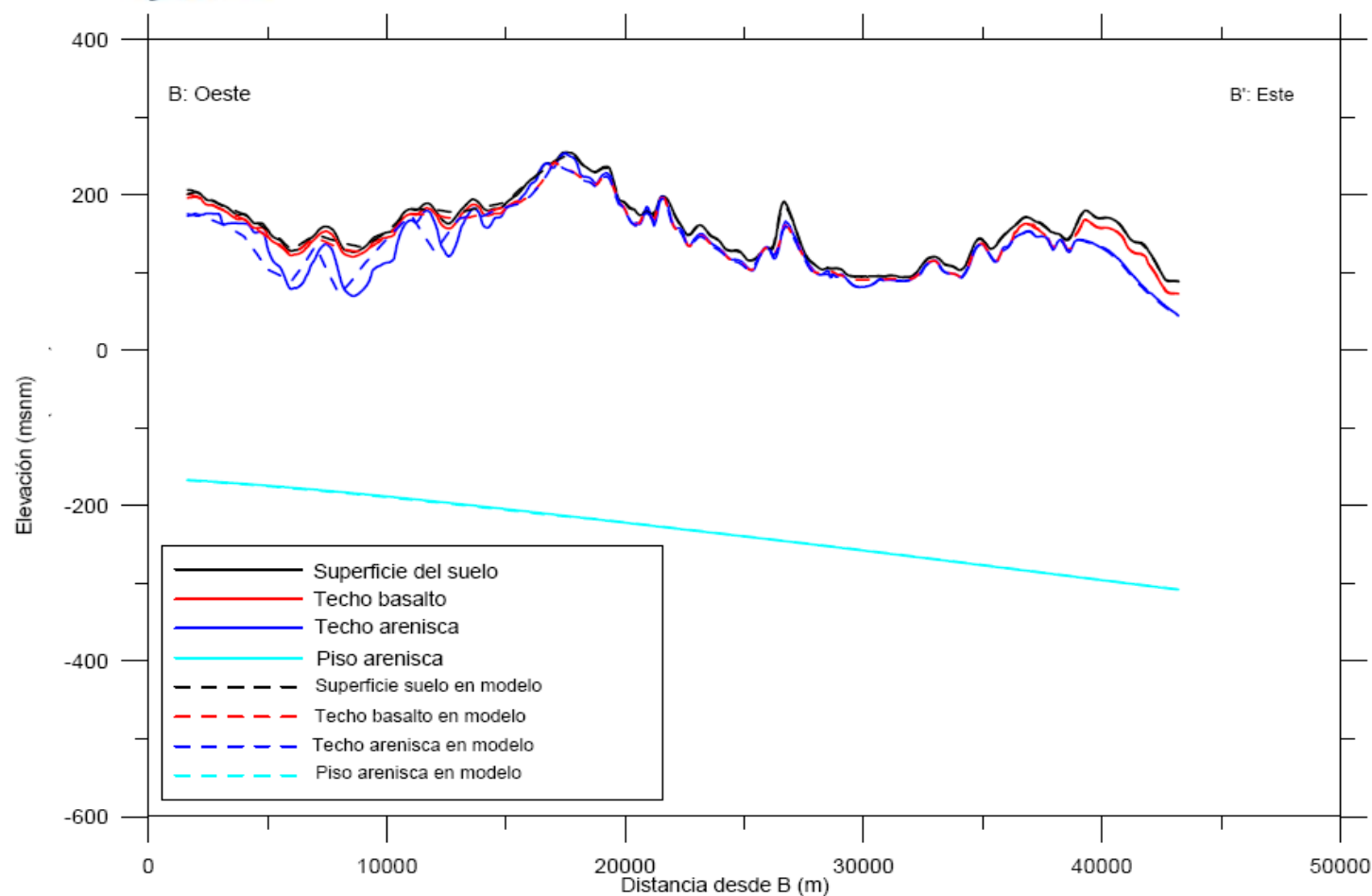


Figura 12. Capas del modelo – Sección transversal Este-Oeste



3.4 Condiciones de borde

En la Figura 13 se muestran las condiciones de borde para el modelo de agua subterránea. Alrededor del perímetro del modelo se asignaron dos tipos de condiciones de borde: condiciones de no flujo, y condiciones de carga específica.

Las condiciones de borde para el caso de no flujo se asignaron a lo largo de los límites occidental y oriental del modelo, y se ubicaron a lo largo de las divisorias inferidas de agua subterránea. Las divisorias se deducen a partir de las elevaciones del agua superficial. Al piso del modelo, representando por el techo de las areniscas del Pérmico, también se le asignó un borde sin flujo.

A lo largo del borde sur del modelo se asignaron condiciones de carga específica, representando al Río Paraná. A los bloques de la cuadrícula en el cuaternario reciente y el basalto que corresponden a la ubicación del río se les asignaron los niveles promedio del río. Como se muestra en la Figura 13, también se asignó a lo largo del límite norte del modelo una condición de borde de carga específica. A lo largo de este borde, los niveles de agua de las areniscas (capa 4 del modelo) se especificaron basándose en la interpolación de los niveles de agua observados. En este sitio la superficie del terreno tiene un declive hacia el norte, y la condición de carga específica acomoda la entrada de flujo del agua subterránea.

3.5 Fuentes y sumideros

En el modelo de flujo de agua subterránea se incorporaron tres fuentes y sumideros de agua:

- Los principales tributarios del río Paraná;
- La recarga; y
- Los pozos.

Los principales tributarios del río Paraná se presentan en la Figura 13 y se simularon con el Paquete de Drenaje MODFLOW. El Paquete de Drenaje en MODFLOW está diseñado para simular los efectos de las características hidrológicas que remueven agua desde el acuífero a una tasa proporcional a la diferencia de carga entre los niveles del agua subterránea y las etapas del drenaje. En el modelo se



especificó un nivel de drenaje y una conductancia de drenaje. Con el Paquete de Drenaje, el agua subterránea solo puede fluir hacia el drenaje cuando el nivel del agua subterránea es mayor que el nivel del drenaje. Cuando el nivel de agua subterránea es menor que o igual al nivel del drenaje, el drenaje no remueve agua del modelo ni recarga agua nuevamente hacia el modelo. Para este estudio, los niveles del drenaje se establecieron en los niveles de agua promedio inferidos en estas características. Las conductancias de los drenajes están relacionadas con la conductividad hidráulica de las formaciones en las cuales se encuentran.

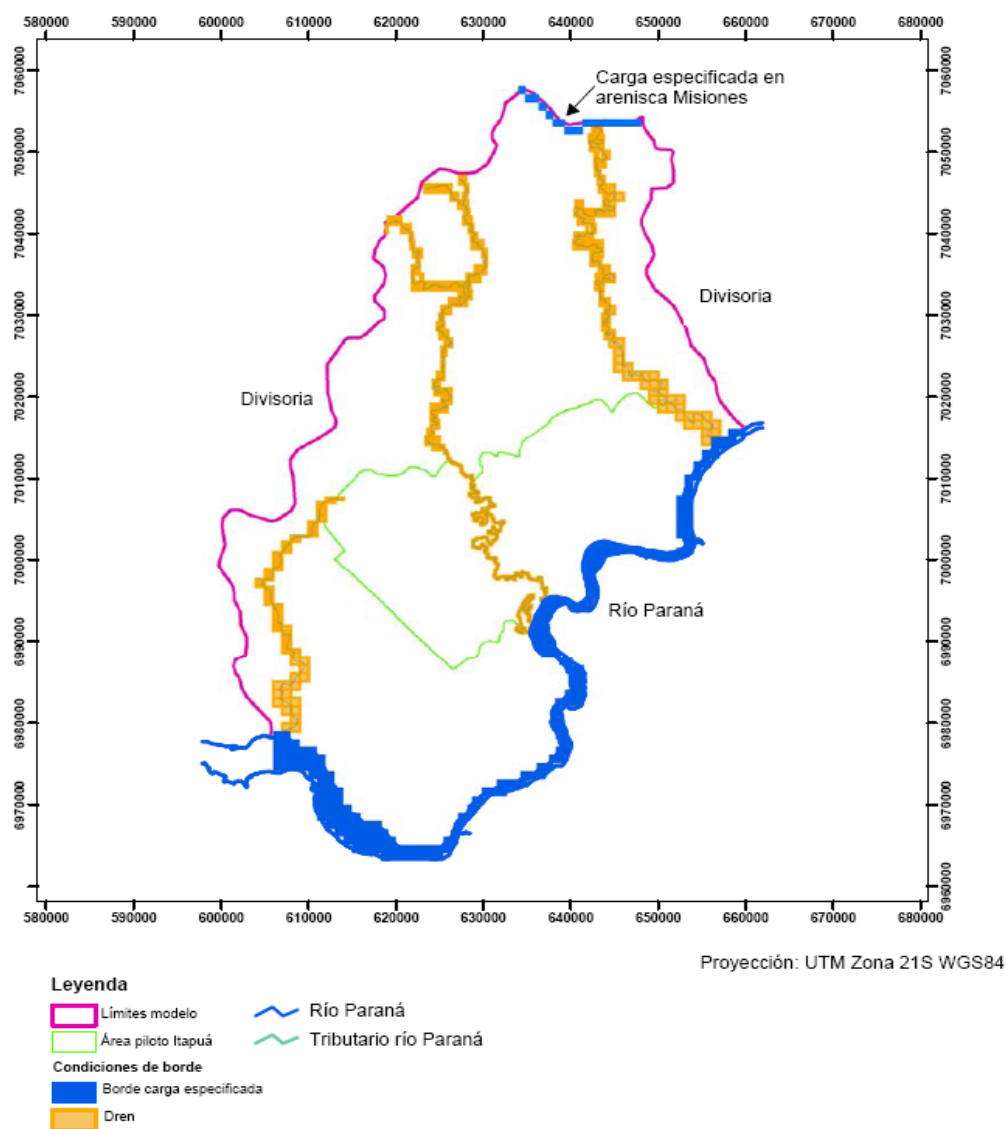


Figura 13. Condiciones de borde del modelo



La recarga se aplicó directamente como una fuente para el nivel freático, y se simuló con el Paquete de Recarga de MODFLOW. Siguiendo el enfoque de Vassolo (*Modelos conceptual y numérico de la zona del proyecto SAG-PY*), se asignó la recarga a dos zonas del área del modelo. En la Figura 14 se muestran esas zonas, y se representan las áreas donde está presente el basalto y el área donde aflora la arenisca.

En la Figura 15 se muestra la ubicación de los pozos de suministro de agua en el área del modelo. Los pozos se simularon con el Paquete de Pozo de MODFLOW. Hay relativamente poca información disponible sobre los pozos. Los pozos se han dividido en dos grupos, aquellos que explotan agua del basalto y aquellos que explotan agua de la arenisca. Para aquellos que no identifican la fuente del acuífero se supuso que los pozos estaban abiertos en la arenisca. Se registró un caudal único para cada pozo, y no hay información disponible para confirmar que los caudales registrados sean promedios representativos o aún si los pozos están activos. Para este análisis se asumió que los caudales registrados representan valores promedio a largo plazo.

Se desarrollaron simulaciones para dos casos: todos los pozos en estado de bombeo y todos los pozos en estado inactivo. Los resultados de las simulaciones no tienen diferencias significativas, y el bombeo no afecta la calibración del modelo. La falta de sensibilidad de los análisis ante el bombeo refleja el hecho de que el bombeo acumulado representa una fracción relativamente pequeña del total del balance hidrológico. El bombeo acumulado es de alrededor de 46.000 m³/día, o cerca del 7% del aporte total hacia el modelo.

3.6 Parámetros y selección de modelo

Para la modelación numérica se utilizó el paquete de modelación de Gradiente Conjugado Pre-condicionado (PCG2 (Hill, 1990) por sus siglas en inglés). En la Tabla 1 se enumeran los parámetros utilizados por este paquete de modelación, lo mismo que los nombres de identificación en el paquete Groundwater Vistas (GW Vistas).



Tabla 1: Parámetros del paquete de modelación MODFLOW PCG2

Parámetro GCP2	Identificador de GW Vistas	Valor
MXITER	Máximas iteraciones externas	100
ITER1	Máximas iteraciones internas	25
HCLOSE	Criterio de cambio de carga	0,001
RCLOSE	Criterio residuales para la convergencia	1
RELAX	Parámetro de relajación	1
NPCOND	Método de matriz preconditionada	Cholesky
NBPOL	Máximo bound en valor Eigen	2
MUTPCG	Opción de impresión de paquete de modelación	Imprimir todos
IPRPCG	Resumen de información GCP2 impresa en cada iteración	5
DAMP	Factor de amortiguación (0,0 a 1,0)	1
-	Converger si se cumplen criterios para iteraciones exteriores	9.999

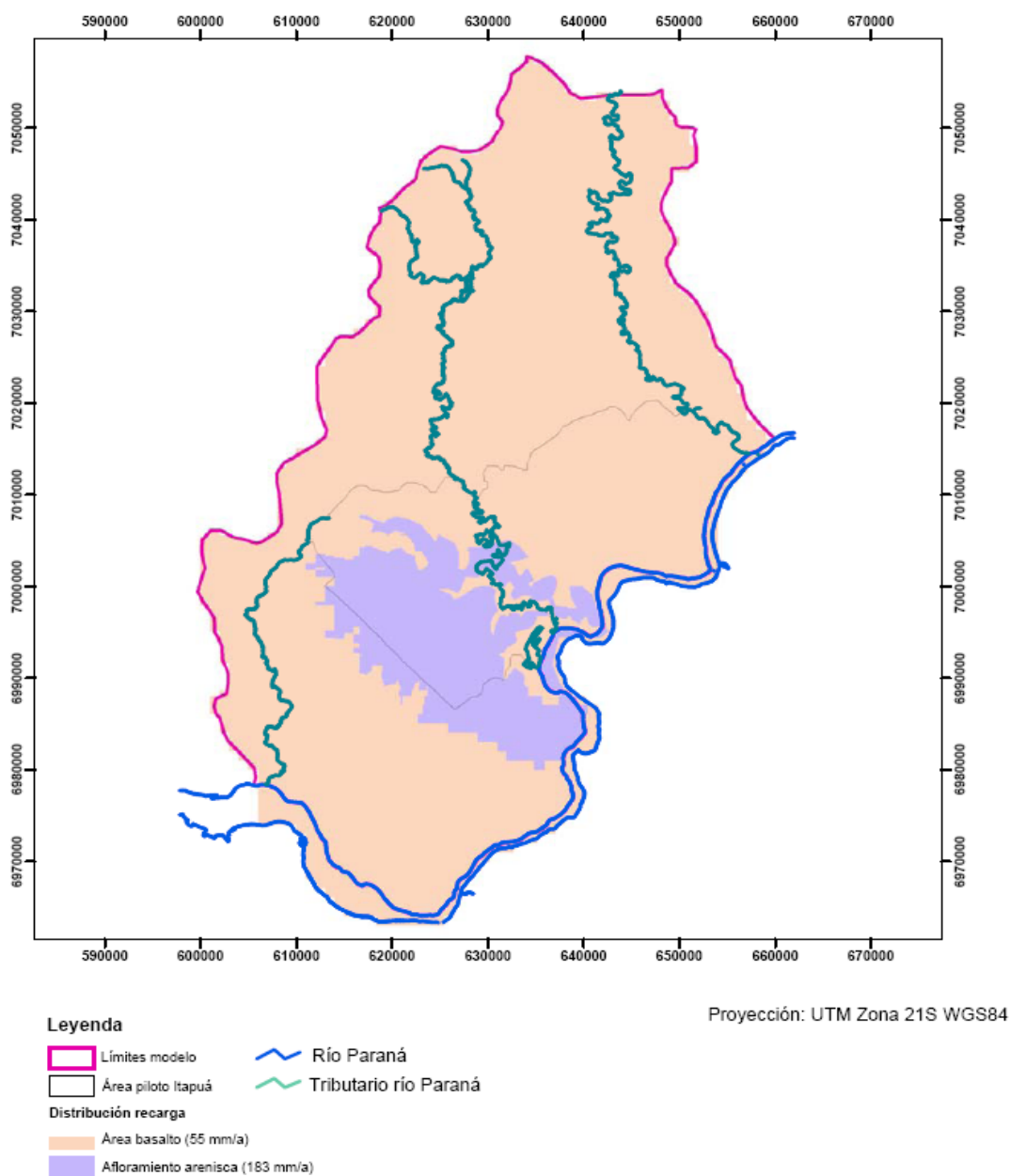


Figura 14. Distribución de la recarga

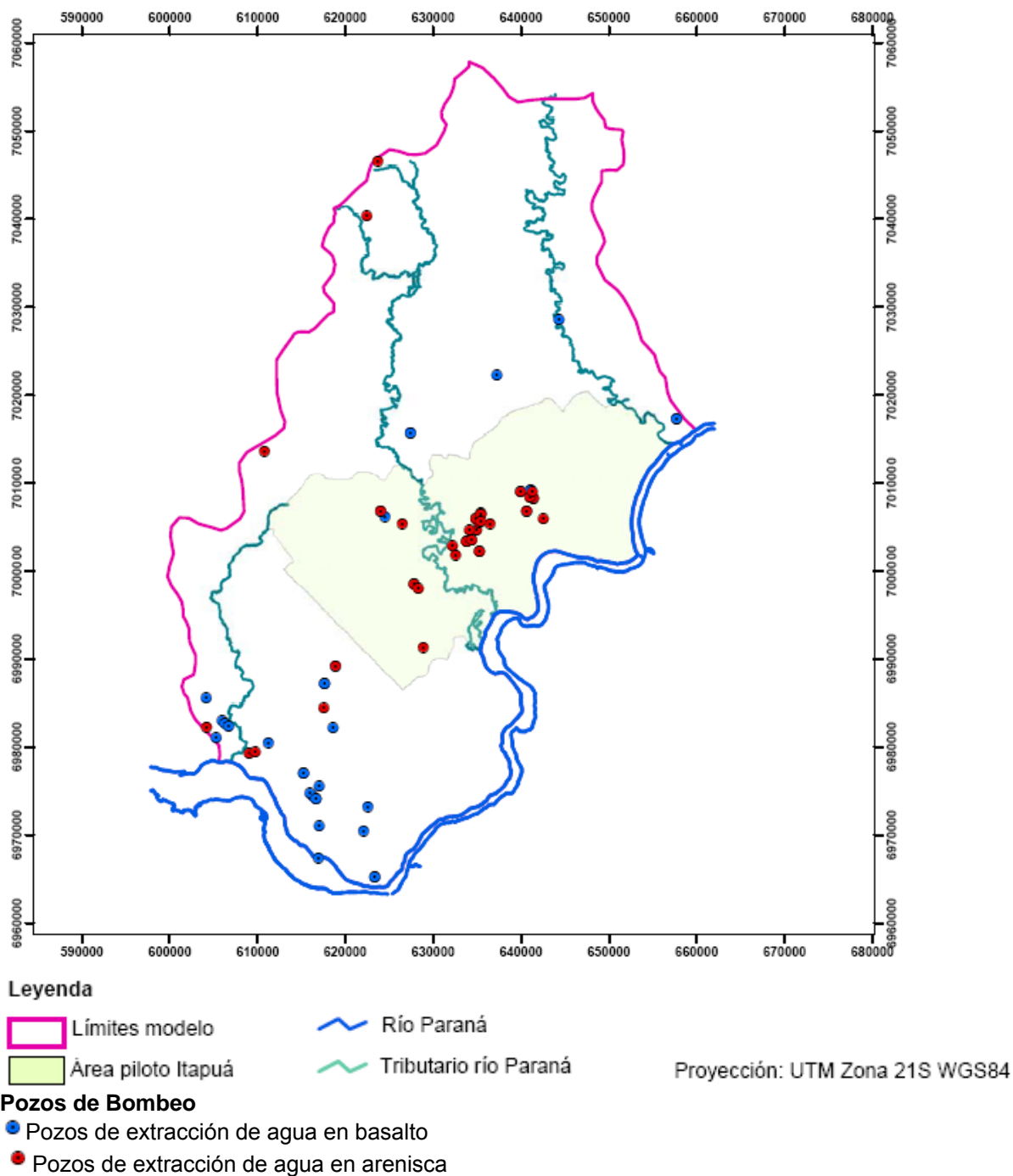


Figura 15. Ubicación de pozos de bombeo



4.0 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración se refiere al proceso de ajustar el modelo dentro de límites físicamente razonables para alcanzar una correspondencia cercana entre los cálculos del modelo y las observaciones. El proceso de modelación que se presenta en este informe consta de cuatro etapas:

- Desarrollo de la estrategia y enfoque de calibración,
- Asignación de estimación de parámetros iniciales,
- Evaluación del modelo calibrado, y
- Análisis de sensibilidad

4.1 Estrategia y enfoque de la calibración

La metodología de calibración consiste en identificar los parámetros claves del modelo y variar dichos parámetros dentro de límites razonables. Los parámetros de entrada que se ajustan durante la calibración del modelo son la conductividad hidráulica horizontal y la recarga. Para la calibración se utilizan las técnicas de calibración por computadora y el enfoque de “prueba y estudio”. Para representar las propiedades de la sub-superficie se adopta un enfoque intencionalmente sencillo. A cada una de las cuatro capas del modelo se le asigna una conductividad hidráulica uniforme la cual se ajusta durante la calibración. Se calculan los valores óptimos de parámetros con el código calculador de parámetros PEST (Watermark Numerical Computing, 2004).

Los objetivos de la calibración del modelo son puntos de niveles de agua subterránea usados como pozos de monitoreo y pozos de suministro de agua en el área de estudio. La ubicación de los pozos se presenta en la Figura 16. Los sitios corresponden a un pozo abierto a través del basalto o la arenisca, para el cual se conoce el nivel de agua.

El ajuste del modelo a las observaciones se evalúa utilizando medidas cuantitativas y cualitativas (ASTM, 1993). La evaluación cuantitativa consiste en una comparación estadística entre los niveles de agua observados y calculados. Las estadísticas se calculan sobre los pesos residuales, donde el valor residual se define como la diferencia entre los niveles de agua calculados y observados en un punto particular de observación. Se establece un peso para los residuales según la importancia relativa que se asigna a las observaciones. Las observaciones de pozos de agua en el área de Itapúa se consideran más significativos respecto al análisis, y se

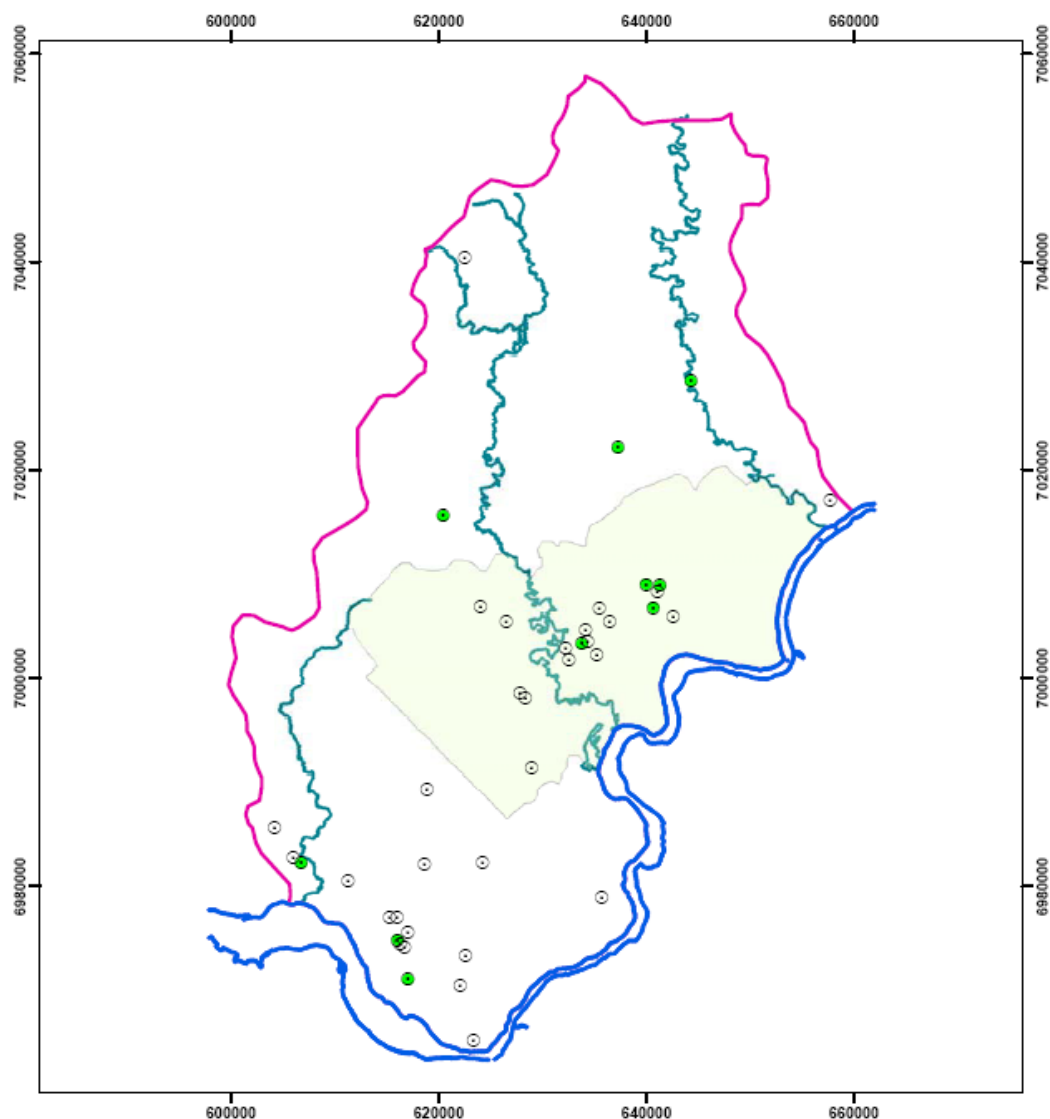


les asigna un valor 1,0. Los pozos que están fuera de los límites del área piloto son considerados menos significativos y se les asigna un peso de 0,10. Las estadísticas típicas incluyen la media residual y la raíz cuadrática media de la media residual.

La evaluación cualitativa consiste en la comparación visual de los sentidos de flujo del agua subterránea inferidos a partir del mapeo del nivel de agua. La evaluación cualitativa también incluye el chequeo del balance de flujo calculado, para asegurar que esté dentro de límites físicamente realistas y sea consistente con el modelo conceptual. Asimismo, la evaluación cualitativa incluye la preparación de un diagrama de dispersión de niveles de agua calculados versus los observados. Los diagramas de dispersión son un método estándar para proveer una impresión visual de la calidad de ajuste para un modelo numérico de flujo de agua subterránea.

4.2 Estimación inicial de parámetros

La estimación inicial de los parámetros se obtiene de la modelación numérica a gran escala de Vassolo para el proyecto SAG-PY (Modelos conceptual y numérico de la zona del proyecto SAG-PY, Tabla 1). Vassolo no informa los valores de conductividad hidráulica del cuaternario reciente.



Leyenda

Límites modelo

Área piloto Itapúa

~ Río Paraná

~ Tributario río Paraná

Proyección: UTM Zona 21S WGS84

Objetivos calibración

● Pozos en basalto

○ Pozos en arsenica

Figura 16. Ubicación de los objetivos de calibración



**SNC•LAVALIN
International**





Formación	K_H (m/d)	K_V (m/d)
Basalto Alto Paraná (Basalto)	0,2	0,05
Arenisca Misiones (Arenisca)	5	0,5

Vassolo también enuncia las estimaciones de recarga:

Área	Tasa de recarga (mm/año)
Afloramiento de areniscas	183
Fuera del área de areniscas (Basalto)	36,5

4.3 Resultados de la calibración

En la Tabla 2 se presentan los resultados detallados obtenidos con el modelo calibrado de flujo de agua subterránea. La Tabla incluye el cálculo de la diferencia entre los niveles de agua calculados y observados. Estas diferencias, llamadas residuales, se calculan como:

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

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 menores que los niveles observados. Los residuales negativos indican sitios donde los niveles de agua calculados superan a los niveles observados.

La comparación entre los niveles de agua observados y calculados se ilustra en los diagramas de dispersión que se presentan en la Figura 17. Los objetivos de calibración se distinguen de acuerdo a si están ubicados en el basalto o la arenisca, y si están ubicados dentro del área piloto

Itapúa. Como se muestra en la figura, los puntos de calibración parecen estar dispersos al azar cercanos a la línea de igualdad. Los residuales más pequeños corresponden a los calculados para los pozos ubicados dentro del área piloto Itapúa.



Tabla 2: Comparación entre los niveles de agua observados y calculados

Well ID	Unit	h_{OBS} (m ASL)	h_{CALC} (m ASL)	Calibration Weight	Residual (m)	
					Weighted	Raw
IT-P0384	Basalt	114.00	118.42	1.0	-4.42	-4.42
SAGPY035IT	Basalt	149.93	156.73	1.0	-6.80	-6.80
IT-P0314	Basalt	163.00	156.81	1.0	6.19	6.19
IT-P0313	Basalt	184.96	146.65	0.1	3.83	38.31
IT-P0034	Sandstone	110.04	137.84	0.1	-2.78	-27.80
IT-P0028	Sandstone	117.24	121.55	1.0	-4.31	-4.31
IT-P0058	Sandstone	116.23	115.66	1.0	0.56	0.56
IT-P0027	Sandstone	116.37	116.67	1.0	-0.31	-0.31
IT-P0336	Sandstone	115.00	118.04	1.0	-3.04	-3.04
20043	Sandstone	115.00	115.88	1.0	-0.88	-0.88
IT-P0376	Sandstone	116.50	115.12	1.0	1.38	1.38
IT-P0035	Sandstone	128.29	135.60	1.0	-7.31	-7.31
IT-P0327	Sandstone	121.00	123.17	1.0	-2.17	-2.17
IT-P0141	Sandstone	127.50	136.39	1.0	-8.89	-8.89
IT-P0031	Sandstone	142.56	162.72	1.0	-20.16	-20.16
IT-P0037	Sandstone	156.86	128.00	1.0	28.86	28.86
7285	Sandstone	168.00	150.56	1.0	17.44	17.44
IT-P0281	Basalt	97.00	95.40	1.0	1.60	1.60
IT-P0203	Basalt	106.10	105.00	1.0	1.10	1.10
IT-P0303	Basalt	132.64	143.24	1.0	-10.60	-10.60
IT-P0125	Basalt	130.07	107.47	1.0	22.60	22.60
IT-P0291	Basalt	200.00	195.13	1.0	17.32	17.32
IT-P0071	Basalt	201.16	188.11	1.0	13.06	13.06
SAGPY061IT	Sandstone	133.95	135.88	1.0	-1.93	-1.93
IT-P0067	Sandstone	106.21	103.16	1.0	3.04	3.04
IT-P0088	Sandstone	108.75	117.60	1.0	-8.85	-8.85
IT-P0047	Sandstone	102.24	115.72	1.0	-13.48	-13.48
IT-P0124	Sandstone	107.24	129.61	1.0	-22.37	-22.37
IT-P0278	Sandstone	102.00	122.80	1.0	-20.80	-20.80
IT-P0084	Sandstone	107.88	112.08	1.0	-4.21	-4.21
IT-P0247	Sandstone	117.36	120.14	1.0	-2.77	-2.77
IT-P0048	Sandstone	116.82	112.28	1.0	4.55	4.55
IT-P0086	Sandstone	130.45	135.18	1.0	-4.74	-4.74
IT-P0078	Sandstone	138.50	110.97	0.1	2.75	27.53
IT-P0079	Sandstone	146.22	110.68	0.1	3.55	35.54
IT-P0049	Sandstone	147.00	115.49	0.1	3.15	31.51
IT-P0010	Sandstone	167.50	152.03	1.0	15.47	15.47
IT-P0040	Sandstone	243.78	220.64	0.1	2.31	23.14



En la Figura 17 también se incluye el resumen estadístico para los residuales. La media residual es de -0,45 m. La media del residuo está relativamente cercana a cero, lo que indica que el modelo calibrado no tiene una desviación sistemática de subestimar ni sobreestimar los niveles de agua.

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

$$\text{NRMS (\%)} = \frac{\text{Raíz cuadrática media del residual}}{\text{Rango de observaciones}} \times 100$$

Rango de observaciones

La raíz cuadrática media (RCM) del residual es de 10,54 m. Los niveles observados de agua subterránea en la cuenca hidrográfica varían entre 97 msnm y 244 msnm. El rango en las observaciones es de alrededor de 147 m. La RCM del residual corresponde al 7,2% del rango de los niveles de agua observados. Spitz y Moreno (1996; corregido en 2003) sugieren que un 10% del rango de observación es aceptable para un modelo de flujo de agua subterránea.

El coeficiente de correlación entre los niveles de agua observados y calculados es de 0,87. Spitz y Moreno (1996; corregido en 2003) sugieren que el coeficiente de correlación para un modelo de flujo calibrado adecuadamente debe estar entre 0,7 y 1,0.

Los residuales mínimos y máximos son -22,4 m y +28,9 m, respectivamente, y la media residual absoluta es de 7,6 m. Para resaltar la variabilidad de la información disponible de los niveles de agua, en la Figura 18 se presenta la distribución espacial de los residuales del modelo. En esta Figura los símbolos están a escala con respecto a la magnitud del residual. Como se muestra en esa Figura, en algunos lugares hay residuales positivos y negativos relativamente grandes que se encuentran muy cerca entre sí. Los patrones de residuales sugieren que hay una variabilidad inherente en los objetivos de calibración que no puede resolverse en el análisis. Los resultados mostrados en la Figura 18 sugieren que los objetivos de calibración en sí mismos tienen un grado de incertidumbre relativamente alto. La dispersión en la calibración puede ser reducida haciendo un levantamiento de los pozos y recolectando niveles de agua durante largo tiempo en lugares claves. Sin embargo, es importante notar que las variaciones a escala local en los



niveles de agua también son características del flujo controlado por las fracturas tanto en el basalto como en las areniscas.

En la Figura 19 se muestra la distribución de probabilidad acumulada de los residuales del modelo. Hill (1998) sugirió que los residuales de la calibración del modelo deberían estar distribuidos normalmente. El trazado se aproxima a una línea recta, sugiriendo que la mayoría de los residuales son consistentes con una distribución normal.

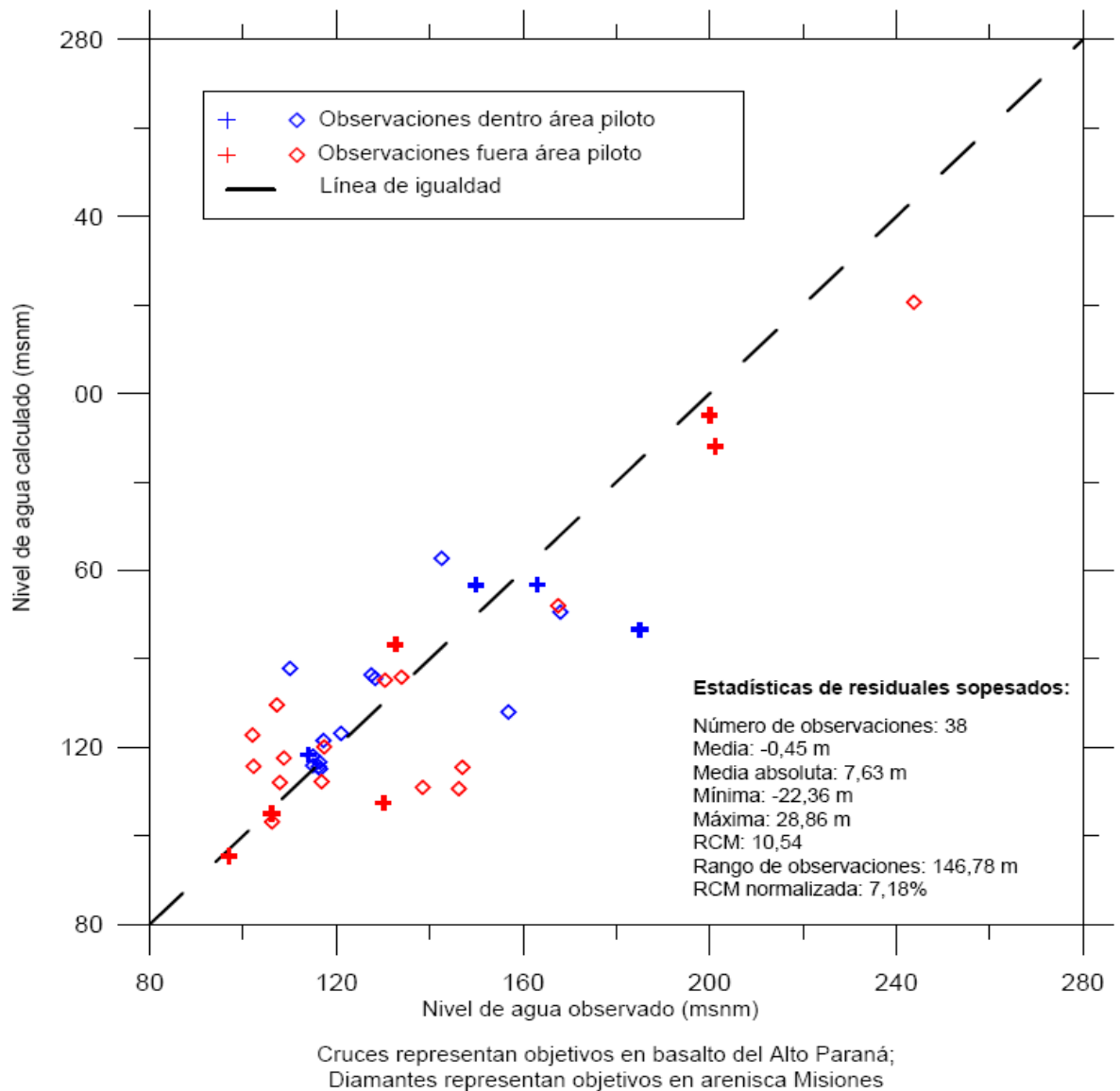


Figura 17. Comparación entre niveles de agua subterránea observados y calculados

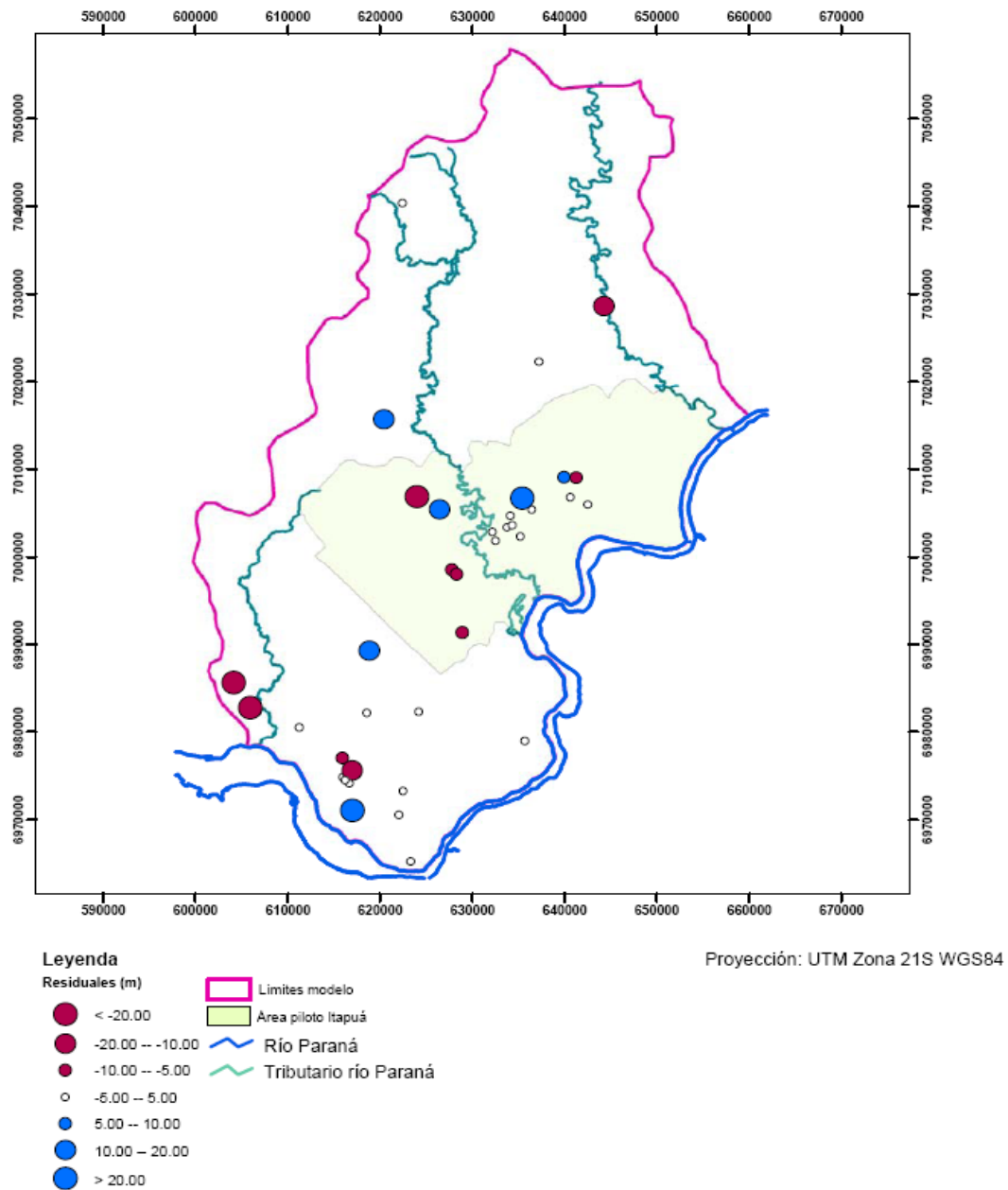


Figura 18. Residuales del modelo

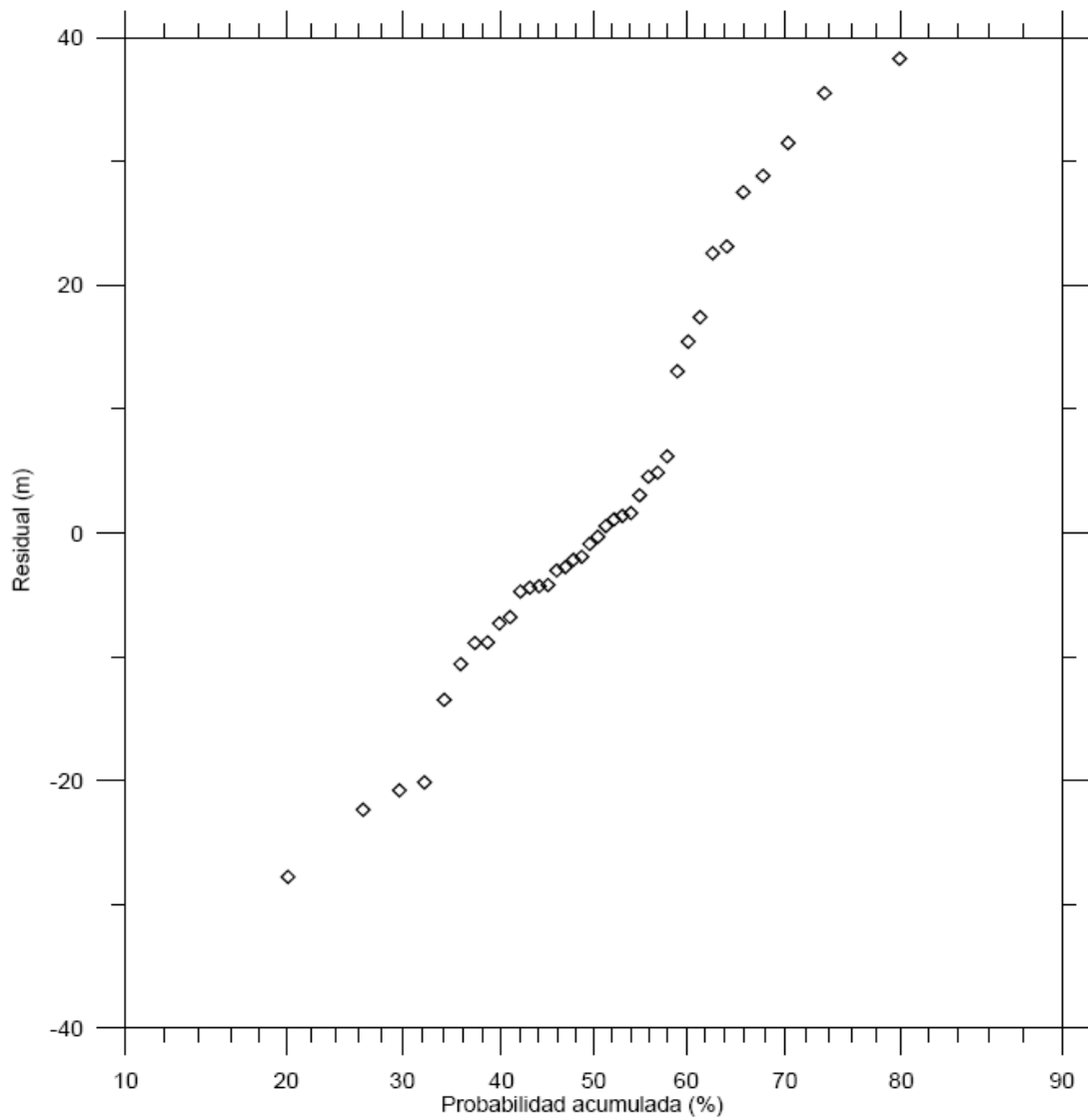


Figura 19. Distribución de probabilidad acumulada de los residuales del modelo



4.4 Evaluación del modelo calibrado

A continuación se presentan las conductividades hidráulicas estimadas a través de la calibración del modelo. En los análisis se asumió una relación de anisotropía uniforme K_V/K_H de 0,1 .

Formación	K_H (m/d)	K_V (m/d)
Cuaternalio reciente	2,4	0,24
Basalto superior	0,26	0,026
Basalto inferior	0,006	0,0006
Arenisca	1,84	0,184

Se añadió una capa modelo para ofrecerle al basalto la posibilidad de actuar tanto como un acuífero o como un acuitardo. En las áreas donde el basalto es relativamente delgado es probable que esté altamente fracturado y la transmisión de la recarga sea inmediata. En las áreas donde el basalto es más grueso, es probable que su parte más inferior actúe como una tapa sobre la arenisca. Este es precisamente el resultado que se deduce de la calibración del modelo. Se deduce que la conductividad hidráulica del basalto superior es más de 40 veces más alta que el basalto inferior. Los afloramientos de basalto en el área de estudio sugieren que éste tiene grandes fracturas verticales cerca a la superficie (Farina y otros, 2004; Figura 4). Las siguientes tasas de recarga han sido calculadas a través de la calibración del modelo:

Área	Tasa de recarga (mm/año)
Afloramiento de Areniscas	183
Por fuera del área de Areniscas (Basalto)	55

La tasa de recarga sobre el área de afloramiento de las areniscas es la misma que la tasa calculada por Vaháoslo (*Modelos conceptual y numérico de la zona del proyecto SAG-PY*). Durante la calibración del modelo de agua subterránea del área piloto Itapúa, fue necesario incrementar la tasa sobre el área donde se presenta el basalto. La tasa calculada aproximadamente 50% mayor que la tasa deducida por Vassolo, pero aun así es relativamente baja.



Para ubicar en contexto la recarga calculada hemos revisado otros estimativos de precipitación y evapotranspiración potencial. La precipitación promedio anual para la estación climática en Encarnación está entre 1700 y 1750 mm (H. Jackson, SNC-Lavalin, comunicación escrita) [García y Vargas (1996) reportaron una precipitación total anual para Asunción de 1340 mm, la cual es similar (dentro del 20%)]. Un mapa hidrogeológico de Paraguay indica que la evapotranspiración potencial en el área de Itapúa es de alrededor de 1100 mm/año (Mapa Hidrogeológico, PAR 83/005, como se informa en Fariña L. *Resultados preliminares de la hidrogeología en el área de estudio del Sistema Acuífero Guaraní de la parte sur de la región oriental del Paraguay*).

Según estos datos, el excedente disponible para recargar el sistema de agua subterránea es de 625 mm. La recarga estimada sobre el área de afloramiento de areniscas representa cerca de 10% de la precipitación anual y un 30% del excedente. Estos valores son consistentes con los estimativos en la literatura (Bedinger, 1987).

En las Figuras 20 y 21 se presentan las elevaciones del nivel freático y la superficie potenciométrica de la arenisca calculada con el modelo calibrado. En general, el agua subterránea fluye desde las tierras altas hacia el río Paraná. Los niveles de agua en las áreas de tierras altas son de aproximadamente 240 m sobre el nivel del mar (msnm), y disminuyen hasta cerca de 90 msnm en el río Paraná. Las curvas de nivel indican la influencia de tributarios, la cual es por lo general menos marcada en la arenisca. Una comparación de las elevaciones del nivel freático con la interpolación de las curvas de los niveles de agua obtenidos utilizando el método Bayesiano kriging, Figura 5, revela que los patrones generales de los tres mapas de niveles de agua son similares.

En la Tabla 3 se presenta el balance de agua para la simulación calibrada. Una pequeña discrepancia en el balance se calcula entre los afluentes y efluentes totales, la cual indica que las ecuaciones del modelo han sido resueltas correctamente, y la solución numérica es aceptable.

**Tabla 3: Balance de agua para el modelo calibrado**

Ítem	Caudal (m ³ /d)
Afluentes	
Recarga	589.517,5
Limites de carga específica	83.141,8
Afluente total	672.659,3
Efluentes	
Limites de carga específica	209.144,3
Drenes	417.864,1
Pozos	45.652,7
Efluente total	672.661,1
Afluente total-Efluente total	-1,8
Discrepancia (%)	0,00

Los componentes dominantes del balance de agua son la recarga, y la descarga del agua subterránea al río Paraná y sus tributarios. El flujo hacia el modelo a través del límite norte representa cerca del 12% del afluente total. La descarga acumulada de los pozos de suministro de agua representa alrededor del 7% del efluente total.

Aunque los caudales afluentes al río Paraná son significativos en el contexto local, no es posible limitar los resultados obtenidos al modelo calibrado. La descarga total de agua subterránea al río Paraná y sus tributarios desde el área del modelo se calcula en alrededor de 627.000 m³/d. Para ubicar este número en contexto, hemos revisado la información del caudal del río Paraná (García y Vargas, 1996; Camilloni y Barros, 2003). Las estaciones de aforo en Itaipú y Posadas se encuentran aguas arriba y aguas abajo del área Itapúa, respectivamente. Tomando en cuenta el caudal afluente desde el río Iguaçu, el flujo en el río Paraná aumenta en cerca de 1.450 m³/s a lo largo de este tramo (promedio para el período 1931 y 1992). La descarga total de agua subterránea del modelo de Itapúa representa solamente el 0,5% del incremento en el flujo del río. Por esto, a menos que hubiera aforadores en el río Paraná en ambos extremos del área modelada, es poco probable que sea posible aislar el aporte del afluente de agua subterránea.

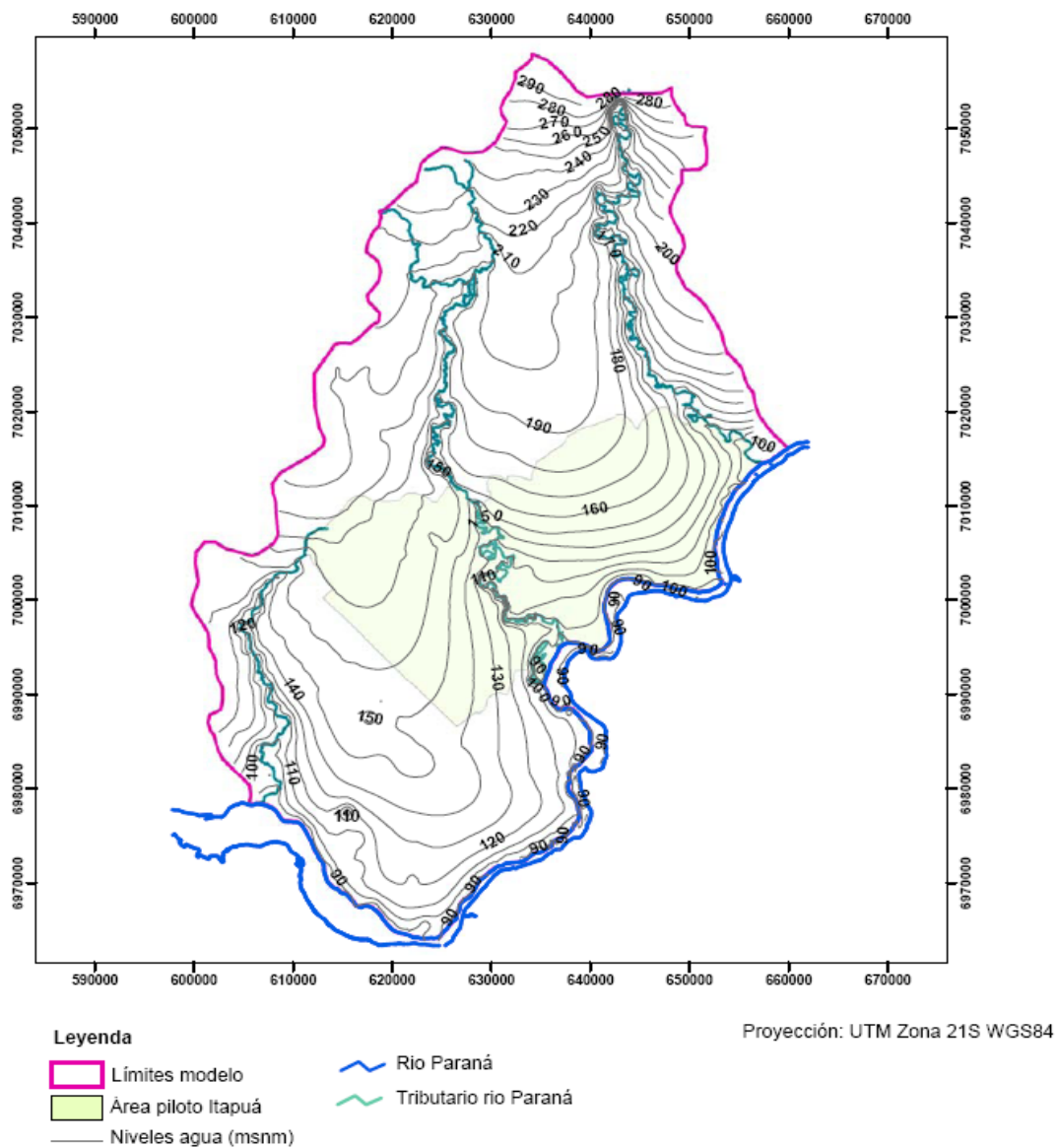


Figura 20. Elevaciones calculadas del nivel freático

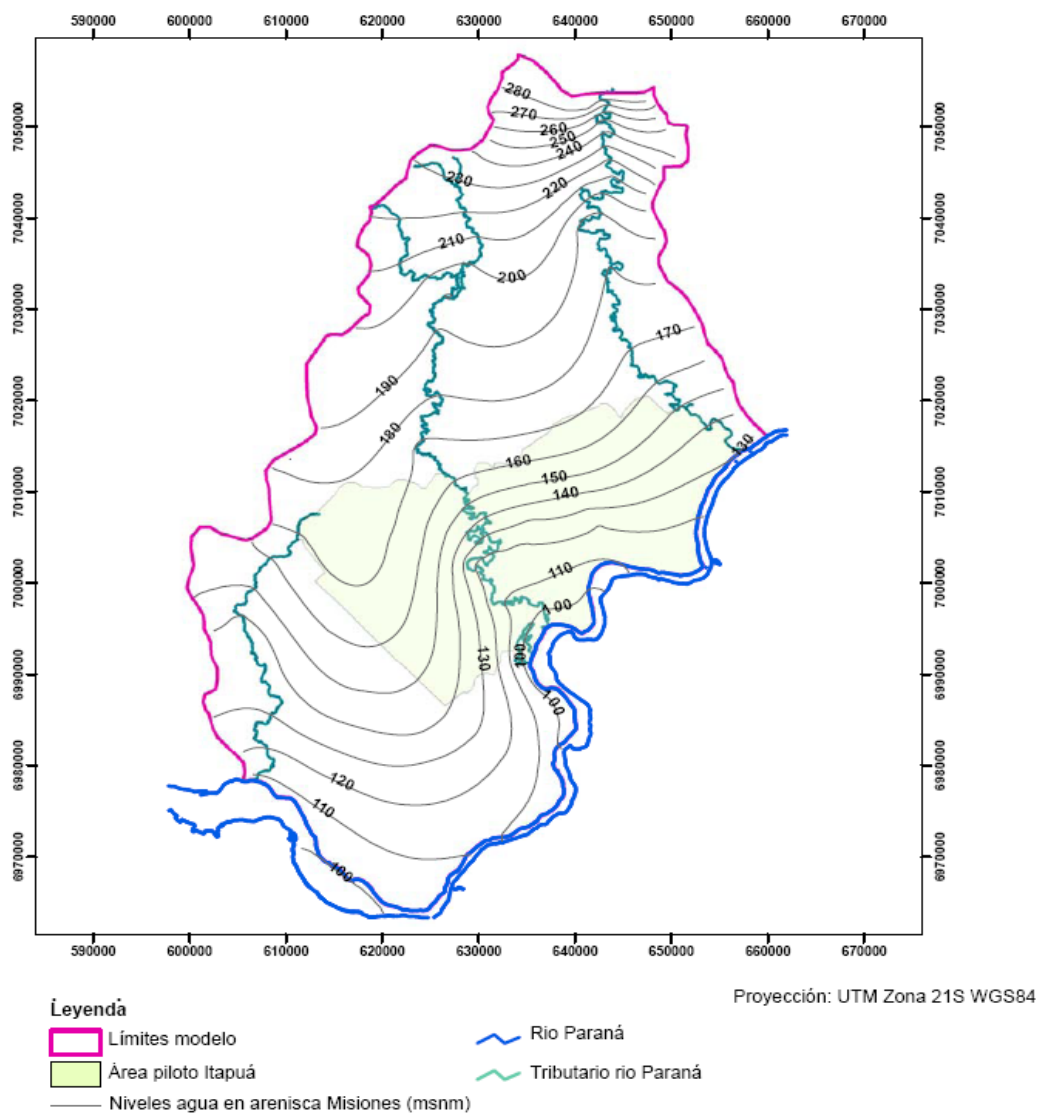


Figura 21. Niveles de agua calculados en la arenisca Misiones



4.5 Análisis de Sensitividad

El programa PEST realiza automáticamente análisis de sensibilidad intentando el ajuste de los valores de parámetros y para imitar los valores observados. Los resultados de PEST para los análisis de sensibilidad se expresan en valores de Sensitividad de Parámetros Compuestos. Este valor es calculado por PEST para juzgar los efectos totales del ajuste del valor de los parámetros a los valores de las observaciones. Los valores de Sensitividad de Parámetros Compuestos calculados para el modelo numérico hidrogeológico de Itapúa se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Análisis de Sensitividad del modelo

Parámetros (Conductividad Hidráulica)	Valor calibrado (m/d)	Sensitividad de Parámetros Compuestos
$K_{\text{Cuaternario reciente}}$	2.40	1.65
$K_{\text{Basalto Superior}}$	0.26	0.91
$K_{\text{Basalto Inferior}}$	0.006	3.32
K_{Arenisca}	1.84	4.59

El ajuste entre los valores de sensibilidad del modelo y las observaciones, es más sensible a los parámetros que poseen más alto valor de Sensitividad de Parámetros Compuestos. Por lo tanto, los resultados para la calibración del modelo de Itapúa revelan que la calibración es mas sensitiva para la Conductividad hidráulica de las Areniscas, y menos sensitiva para la Conductividad hidráulica del Basalto Superior.

Para obtener una mayor comprensión de la respuesta del modelo calibrado, se ha usado PEST para desarrollar un gráfico de análisis de sensibilidad. Los resultados del análisis se presentan

en la Figura 22. Los resultados son fijos en términos de las cantidades sin dimensiones $\frac{\Delta\Phi}{\Phi}$ y $\frac{\Delta K}{K}$. Dónde K representa el valor calibrado de la Conductividad hidráulica de cada unidad estratigráfica, y ΔK representa el cambio en dicho valor del valor calibrado.



$$\Phi = \sum_{i=1}^n (h_{obs} - h_{calc})^2 w_i^2$$

La cantidad Φ representa la función objetiva, esto es, la función PEST intenta mimetizar en su búsqueda por un óptimo conjunto de parámetros de calibración. La función objetiva es la suma de los pesos de residuales cuadráticos, definidos como:

Los pesos w_i representan la significación relativa que se asigna a cada observación. Cada curva que se presenta en la Figura 22, muestra como el error del modelo cambia según cambia el valor de conductividad hidráulica del valor calibrado. Los resultados de la Figura 22 demuestran que los valores de Conductividad hidráulica de la Tabla 4 son óptimos, en la misma forma muestra las observaciones que se alejan de los otros valores. La pendiente relativa de cada curva indica de forma visual la sensibilidad relativa de la Conductividad hidráulica particular. Respecto a la sensibilidad se observa lo siguiente:

K Basalto Superior < K Cuaternario reciente < K Basalto Inferior < K Arenisca

Este es exactamente el orden de los valores de Sensibilidad de Parámetros Compuestos producido por PEST.

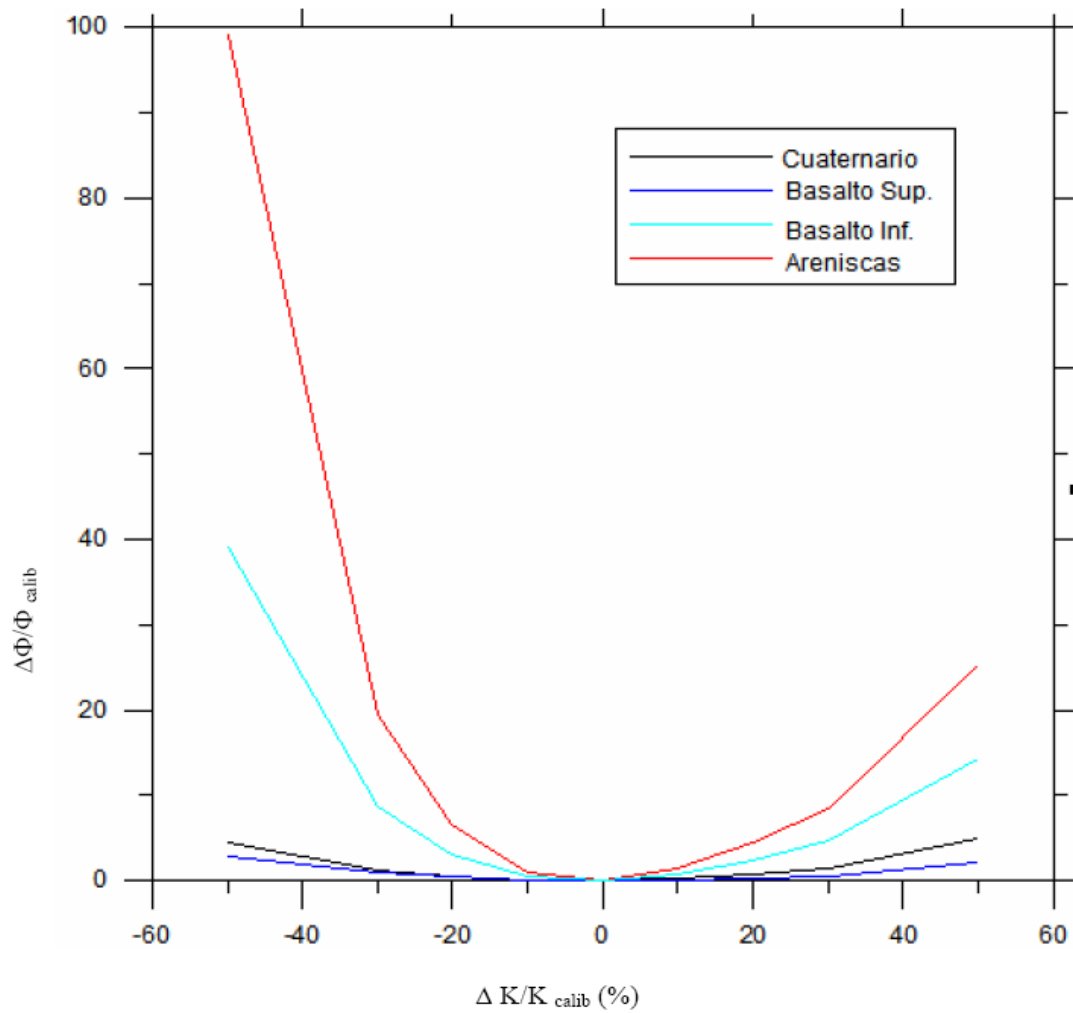


Figure 22. Análisis de Sensitividad para el modelo calibrado



5.0 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para este estudio interpretamos el término validación del modelo como el proceso de demostrar que el modelo calibrado proporciona una representación adecuada del sistema físico. En este caso, hemos verificado la capacidad del modelo calibrado para igualar los resultados de los ensayos hidráulicos llevados a cabo en el área de estudio Itapúa. Hay cinco ensayos disponibles para la validación:

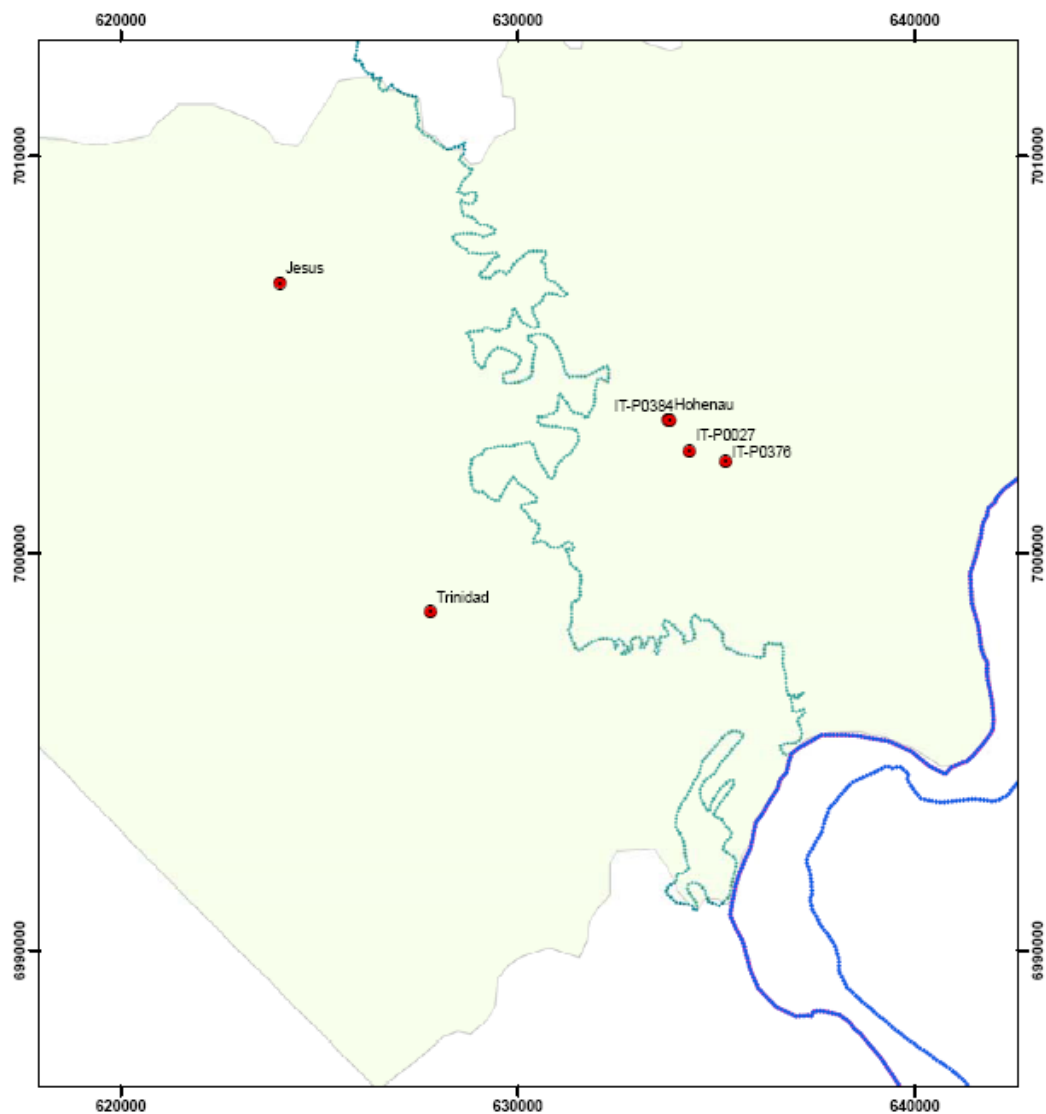
- Hohenau;
- Trinidad;
- Jesús;
- IT-P0376; y
- IT-P0027.

En la Figura 23 se presenta la ubicación de los ensayos hidráulicos. Los cinco pozos están abiertos en la arenisca. En el ensayo en Hohenau, los cambios en los niveles de agua subterránea se midieron en el pozo de bombeo y en el de observación. En los otros cuatro ensayos, los efectos del bombeo se midieron solamente en el pozo de bombeo. En las Figuras 24 a 28 se presentan los datos de cambios observados en los niveles de agua durante los ensayos hidráulicos.

Una comparación de la información de abatimiento por el ensayo hidráulico en el pozo Hohenau y las observaciones de otros ensayos indican que las propiedades del acuífero son significativamente diferentes en este lugar. Los abatimientos son cerca de 100 veces menores. Para este ensayo la transmisividad calculada fue de 2.000 m²/d, la cual excede entre 6 y 250 veces las transmisividades calculadas para los otros ensayos. Ya que no se pudo disponer de una descripción geológica ni de los detalles de la construcción del pozo Hohenau, y como las observaciones durante el ensayo fueron irregulares, los resultados de este ensayo hidráulico se excluyeron de la validación del modelo.



Para los cuatros ensayos restantes, los abatimientos observados al final de los ensayos hidráulicos se compararon con los resultados de las simulaciones de régimen permanente. Las observaciones que se presentan en las Figura 24 a la 28 indican que los niveles de agua en los ensayos de bombeo permanecen casi estables. Por lo tanto, la suposición de que hay condiciones permanentes es razonable. Para cada ensayo, se simuló el flujo permanente con cada pozo bombeando a su caudal reportado. El abatimiento estabilizado se calculó restando el nivel de agua calculado del nivel de agua calculado con el modelo calibrado.



Leyenda

- Límites modelo
- Área piloto Itapúa
- Pozos con ensayo hidráulico
- ~ Rio Paraná
- ~ Tributario rio Paraná

Proyección: UTM Zona 21S WGS84

Figura 23. Ubicación de pozos con ensayos hidráulicos para validación del modelo

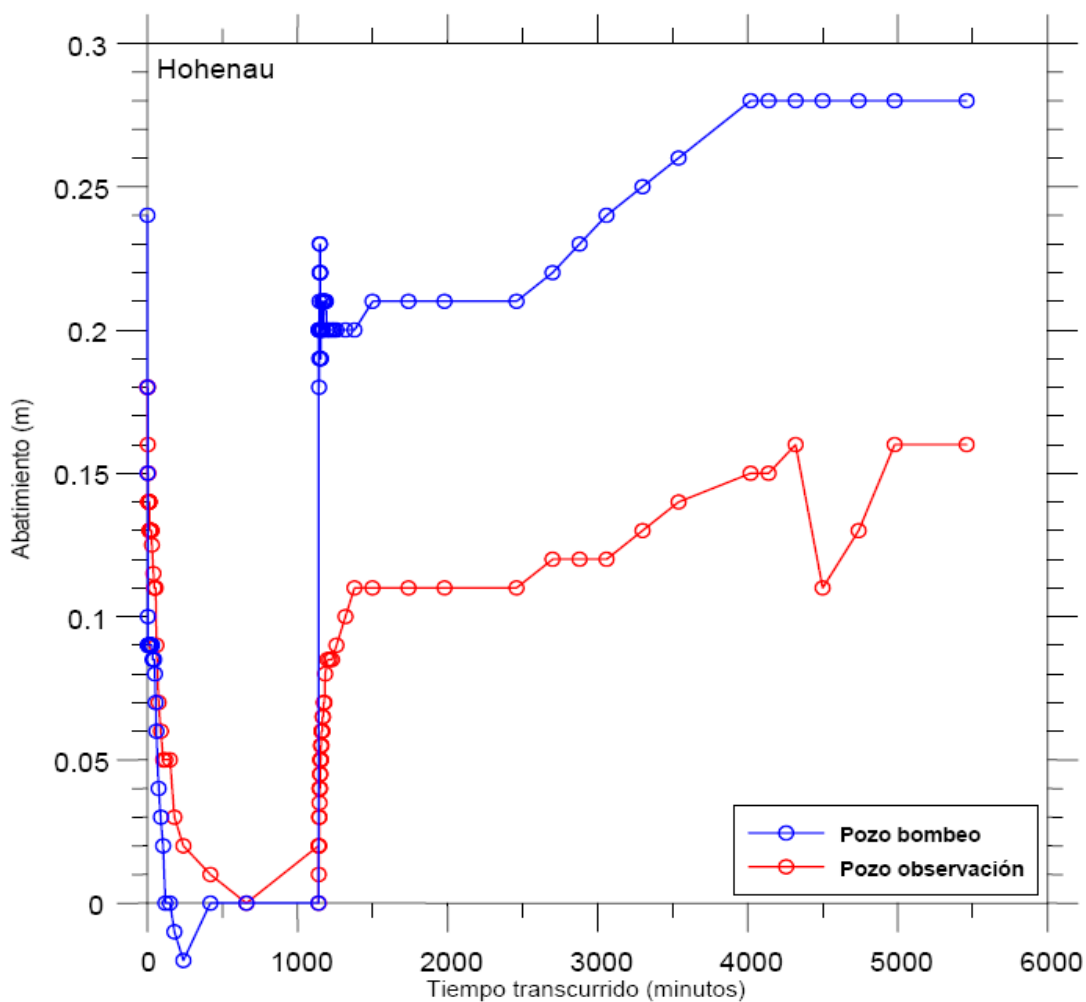


Figura 24. Información del ensayo hidráulico en Hohenau

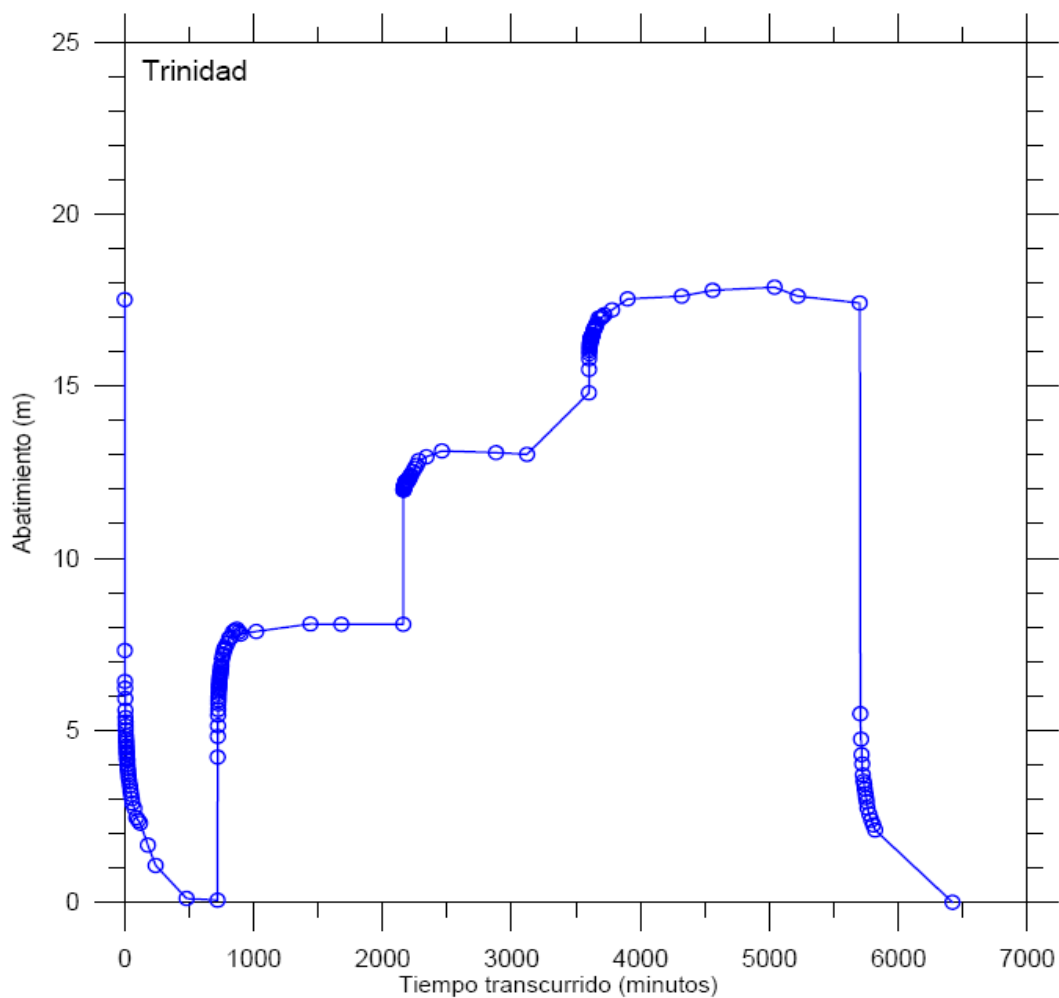


Figura 25. Información del ensayo hidráulico en Trinidad

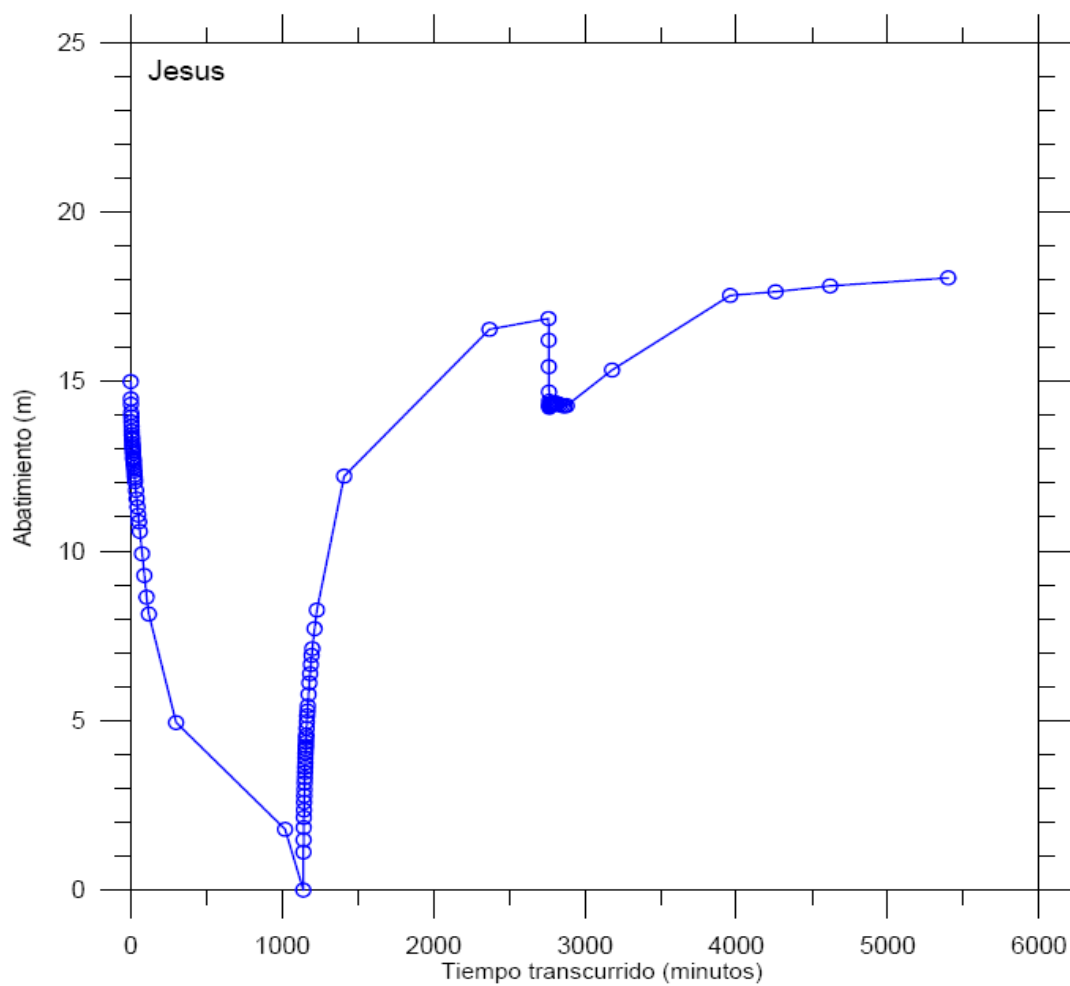


Figura 26. Información del ensayo hidráulico en Jesús

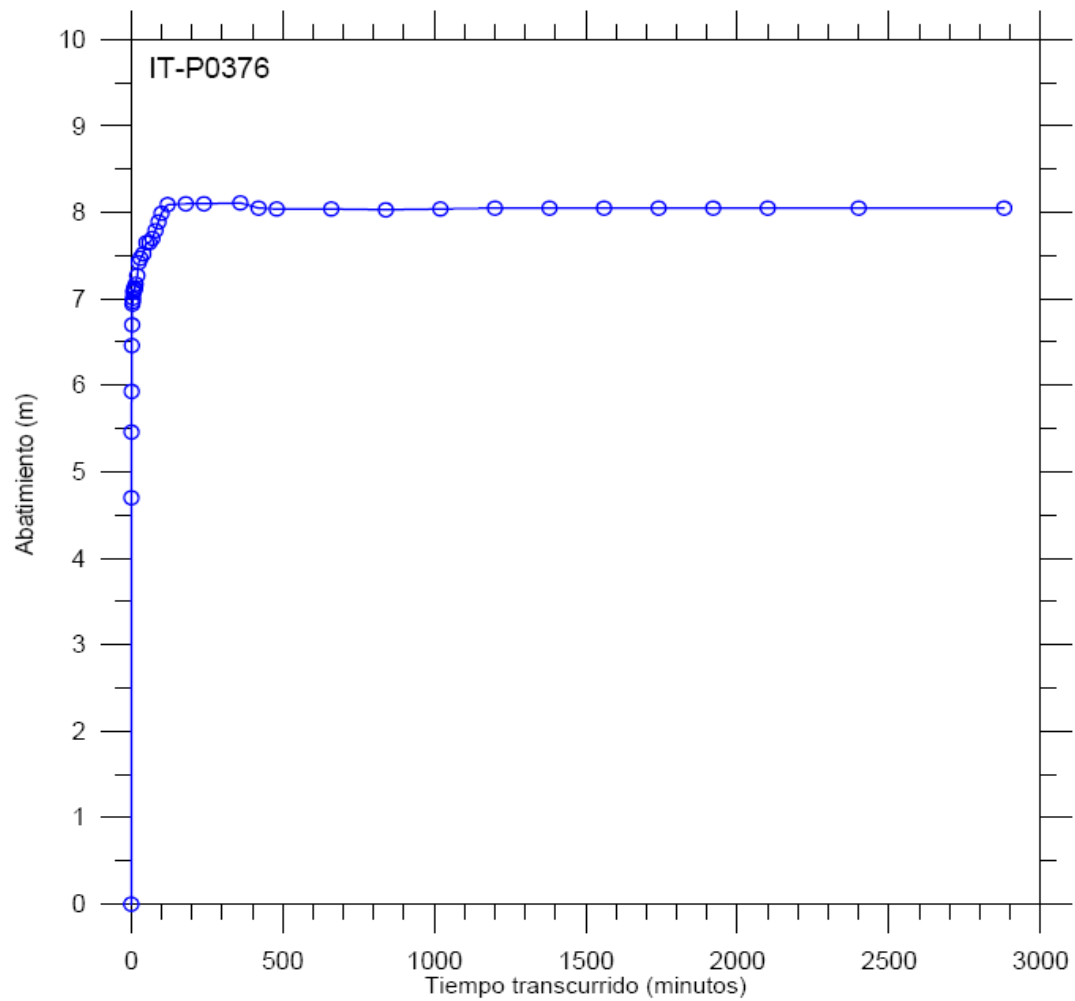


Figura 27. Información del ensayo hidráulico en IT_P0376

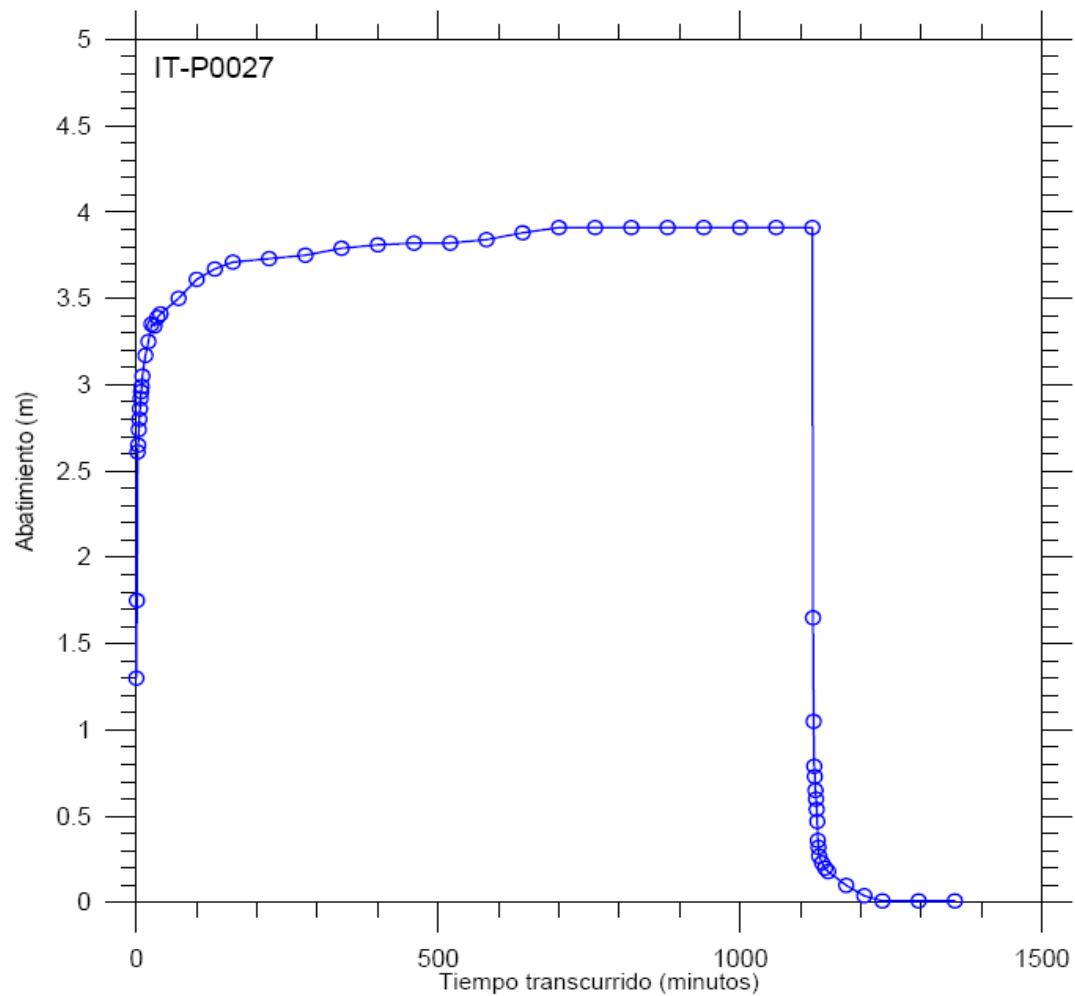


Figura 28. Información del ensayo hidráulico en IT_P0027



Se aplicaron dos correcciones a los abatimientos calculados con el modelo antes de compararlos con las observaciones. Primero, los abatimientos calculados con el modelo se corrigieron para tener en cuenta el hecho de que el diámetro del pozo es pequeño en relación con el tamaño del bloque de la cuadrícula del MODFLOW que contiene al pozo. La corrección puede interpretarse como un abatimiento adicional debido al flujo convergente dentro del bloque de la cuadrícula que contiene al pozo que bombea.

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

donde $\delta_1 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left\{ \frac{r_e}{r_w} \right\}$ es el abatimiento adicional, Q es el caudal de bombeo, T es la transmisividad, r_e es el radio efectivo del bloque del pozo (wellblock), y r_w es el radio del pozo. Para los bloques cuadrados de la cuadrícula y la conductividad hidráulica horizontal isotrópica, se estima que el radio efectivo del bloque del pozo es de $0,208\Delta x$, donde Δx es el espaciamiento de la cuadrícula.

Se requiere una segunda corrección para tener en cuenta el hecho de que los intervalos abiertos de los pozos de bombeo penetran una porción relativamente pequeña del espesor total de la arenisca. Como una primera aproximación, se puede mostrar que para un acuífero verticalmente anisotrópico, la transmisividad efectiva se gradúa con respecto a la longitud del intervalo abierto

(Cooper y otros, 1967; p. 268), $T_{eff} = T \frac{L}{B}$, donde 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. Los cálculos del modelo asumen implícitamente que los pozos penetran todo el espesor del acuífero. Ya que la capacidad de un pozo es directamente proporcional a la transmisividad (ver Walton, 1970, p. 215, por ejemplo), el abatimiento corregido se calcula como:

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

donde s_{calc} es el abatimiento calculado del modelo.



En general, los abatimientos en los ensayos de bombeo también incluyen una contribución del flujo no lineal dentro del pozo (Jacob, 1947; Rushton y Bliss, 1988). Las pérdidas no lineales en pozos pueden calcularse a partir de las observaciones de los abatimientos recolectados para un rango de caudales de bombeo, llamados ensayos escalonados. Esta información está disponible solamente para uno de los ensayos hidráulicos de validación, Trinidad (Figura 25). Los resultados del ensayo de Trinidad se resumen en la Figura 29, donde el abatimiento representa el abatimiento estabilizado al final de cada intervalo de bombeo. Para el ensayo de Trinidad, el caudal de bombeo varía casi linealmente con el abatimiento. Esto indica que para este pozo las pérdidas no lineales de pozo no son significativas. Al no haber otra información asumiremos que esto también es aplicable a los otros pozos. Esta es una suposición razonable dados los bajos caudales de bombeo a los cuales se desarrollaron los ensayos.

En la Figura 30 se muestra la comparación entre los abatimientos finales observados y los abatimientos calculados con el modelo. Hay una dispersión considerable en los resultados; sin embargo, la consistencia de la tendencia general sugiere que el modelo proporciona una representación adecuada del sistema físico bajo condiciones de bombeo.

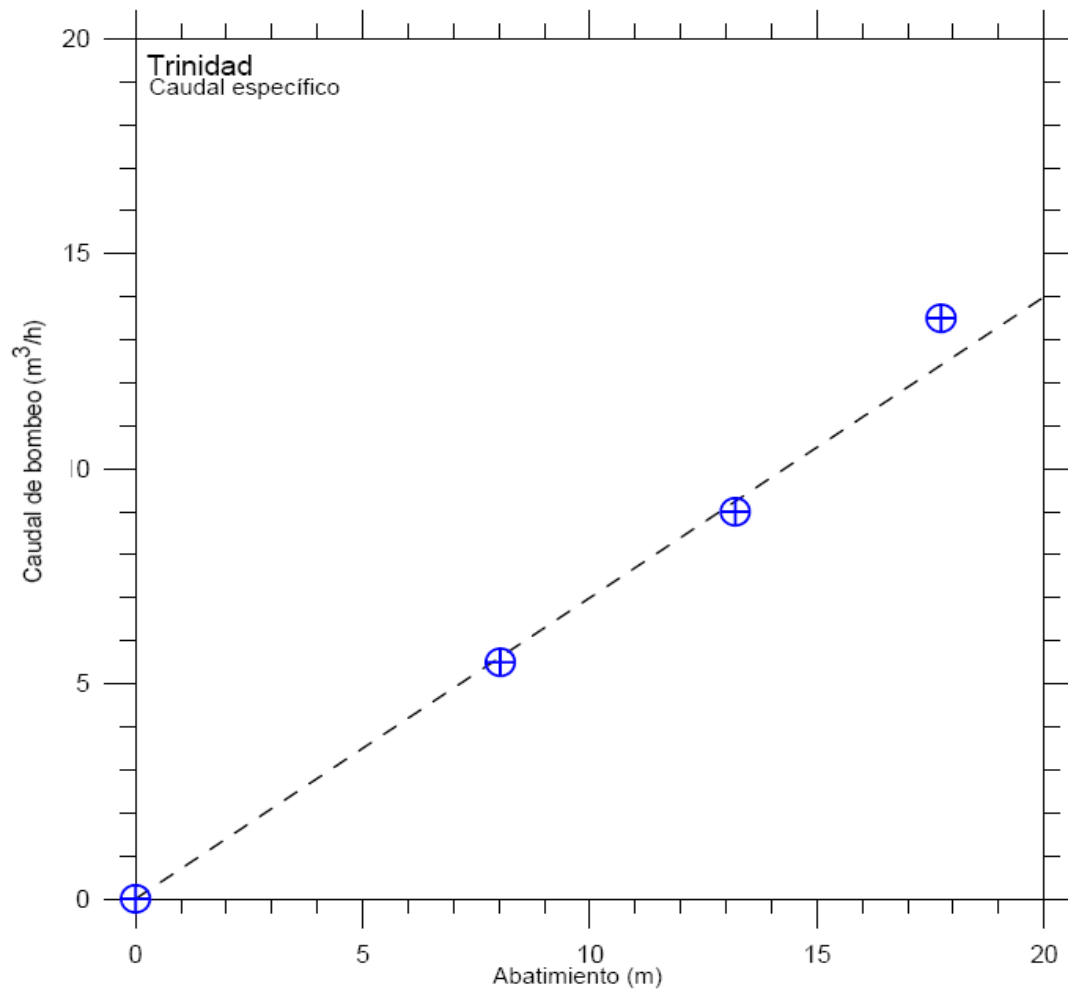


Figura 29. Evaluación de pérdidas no-lineales en el ensayo escalonado en Trinidad

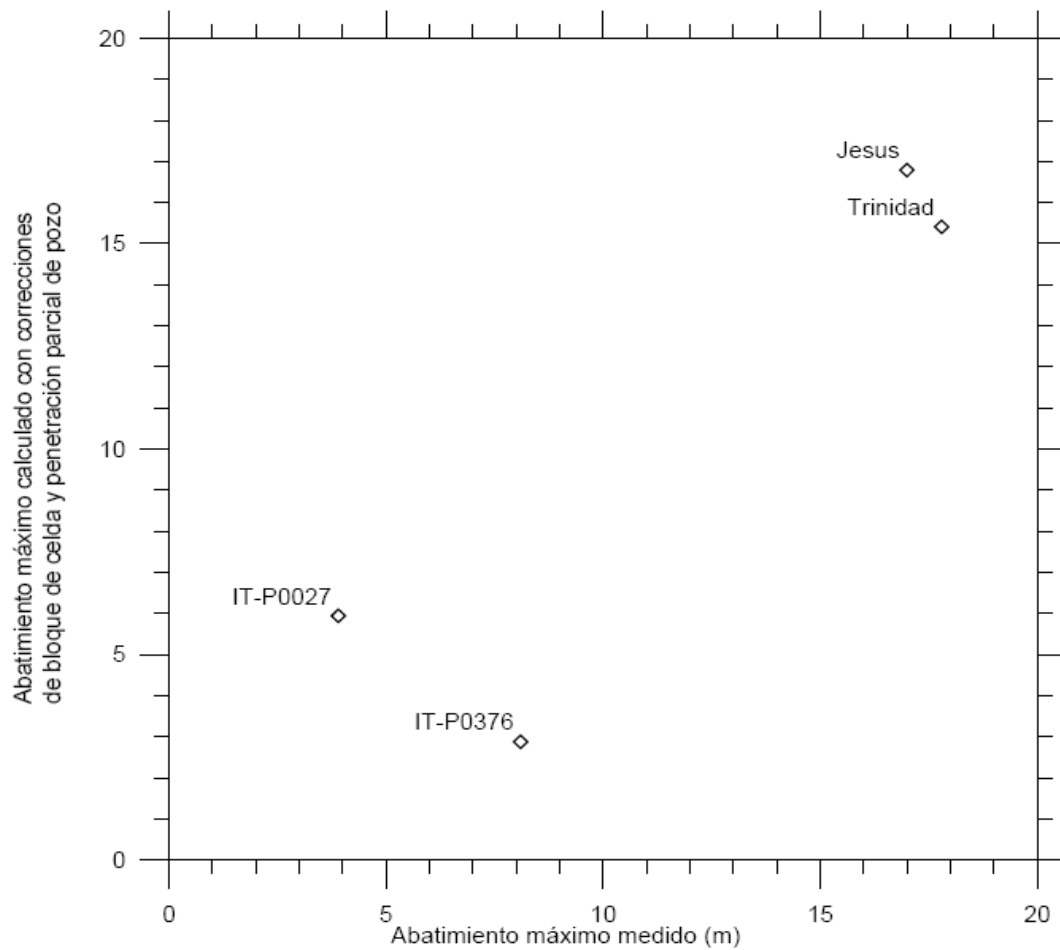


Figura 30. Comparación entre los abatimientos máximos medidos y calculados



6.0 PREDICCIONES DEL MODELO

Para el análisis predictivo, se utiliza el modelo para investigar los efectos potenciales en el sistema de agua subterránea por la construcción de una represa en el río Paraná cerca de Corpus Christi. El estudio de impacto ambiental de Harza-IATASA-Tecma (2002; Figura 2) muestra tres alternativas de sitios para una presa de contención aguas arriba del embalse de la represa de Yacyretá. En el presente estudio se investigan los efectos potenciales de la presa de contención en la ubicación señalada como PINDO-Í; en la Figura 31 se muestra la ubicación.

Para este análisis, se simula el flujo en régimen permanente con los niveles de agua especificados para el río Paraná aumentados a un nivel de 105 msnm a lo largo del tramo del río, aguas arriba de la presa de contención. Para el modelo calibrado, el nivel de agua asignado para el río Paraná en el límite aguas arriba (norte) del modelo es de 105 msnm. Por lo tanto, el efecto de la presa de contención será la elevación del nivel de agua hasta un nivel uniforme de 105 msnm aguas arriba de dicha presa.

En la Figura 32 se observa una gráfica de los niveles de agua pronosticados en la arenisca. La comparación de los niveles potenciométricos mostrados en las Figuras 21 y 32 (pre y post-construcción) indica que los efectos significativos de la construcción de la represa se limitarían a una porción relativamente pequeña del área piloto Itapúa.

El resultado de la simulación de la presa es sólo indicativo, ya que debería hacerse un modelo más detallado de la zona y con una información mucho más profunda (de los espesores y propiedades hidráulicas de las formaciones) y de niveles de agua actuales (no hay pozos reportados en el Informe en la zona de la presa).

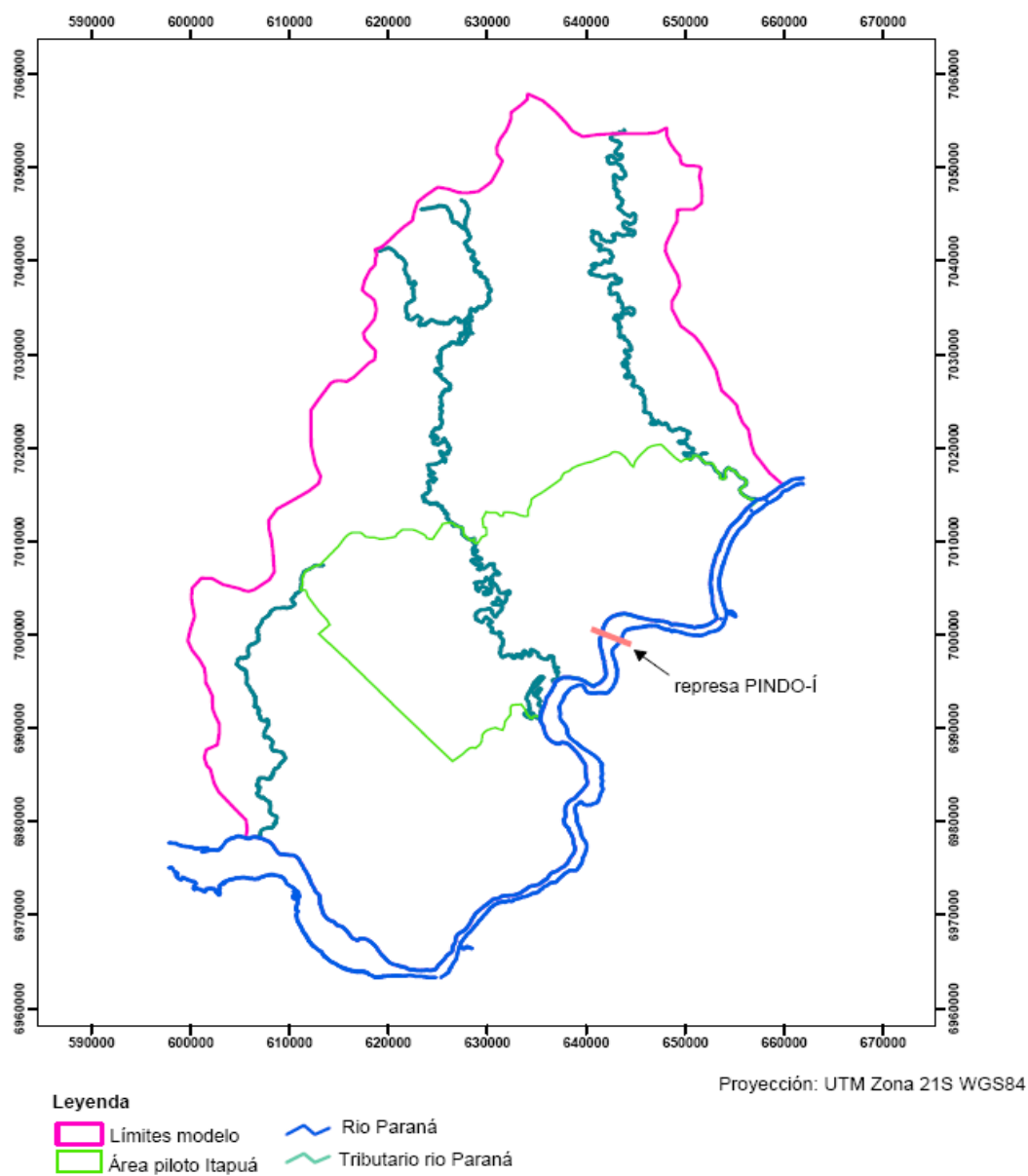


Figura 31. Ubicación de la represa PINDO-Í

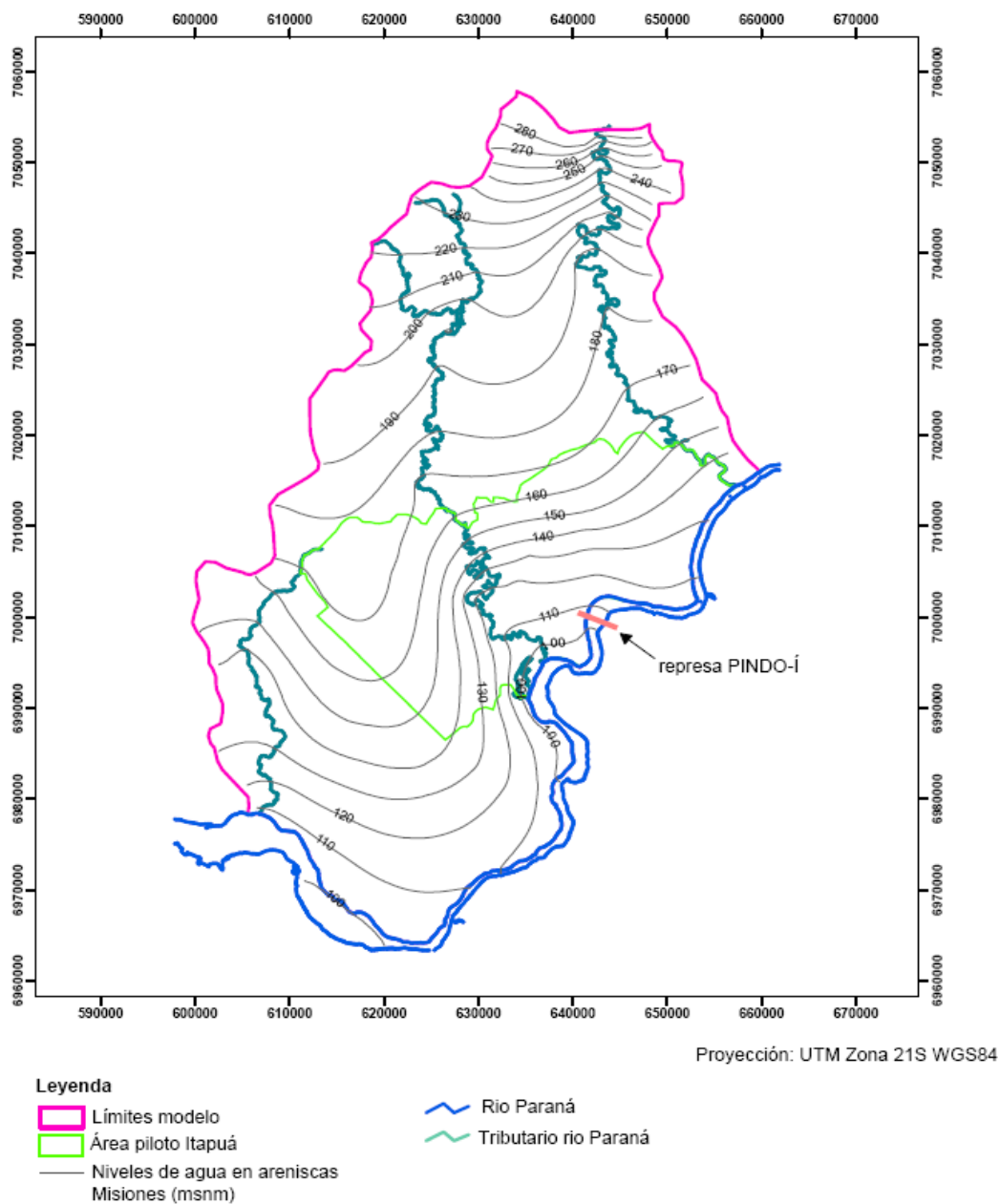


Figura 32. Niveles de agua calculados en la arenisca Misiones con la represa PINDO-Í



En la Tabla 5 se enumeran los componentes del balance hídrico para el análisis predictivo. Como se observa en la Tabla, hay una reducción relativamente pequeña en la descarga de agua subterránea a los tributarios del río Paraná.

Tabla 5: Predicción del balance hídrico para la represa PINDO-Í

Ítem	Caudal (m ³ /d)
Afluentes	
Recarga	589.517,5
Límites de carga específica	83.758,5
Afluente total	673.276,0
Efluente	
Límites de carga específica	205.773,1
Drenes	421.846,9
Pozos	45.652,7
Efluente total	673.272,8



7.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló un modelo numérico hidrogeológico del área piloto Itapúa sintetizando los datos colectados y las interpretaciones desarrolladas para el área. El objetivo específico de la modelación fue desarrollar, calibrar y probar un modelo numérico para el área piloto Itapúa. El objetivo fue alcanzado. En este capítulo se resumen los resultados principales del análisis, se proveen recomendaciones respecto al monitoreo a largo plazo y se sugiere la ubicación potencial para un pozo adicional de investigación.

7.1 Principales resultados del estudio

- El modelo calibrado provee un ajuste relativamente bueno de los niveles de agua observados, como lo indican los criterios siguientes:
 - La media residual es relativamente cercana a cero;
 - La RMS residual corresponde a 7,2% del rango de valores de nivel de agua, lo que es menos que el valor de 10% sugerido como criterio de aceptación;
 - El coeficiente de correlación entre los niveles de agua calculados y observados es 0,87, lo que está en el rango entre 0,7 y 1,0, que ha sido sugerido para un modelo adecuadamente calibrado; y
 - Los residuales tienen una distribución aproximadamente normal, sugiriendo que no existe una desviación sistemática en el análisis.
- El balance hídrico para el modelo calibrado es relativamente bajo, indicando que las ecuaciones del modelo han sido resueltas correctamente, y la solución numérica es aceptable.
- Las tasas de recarga y conductividades hidráulicas estimadas para el modelo calibrado son consistentes con las desarrolladas para análisis previos a escala regional. Las tasas estimadas de recarga representan una fracción físicamente realista del promedio anual de precipitación.



- El modelo ha sido probado simulando cuatro ensayos hidráulicos realizados en el área piloto Itapúa. Los cambios calculados de nivel de agua se ajustan a la tendencia general de observaciones. Sin embargo, los resultados de la prueba ponen en evidencia que las propiedades de la arenisca Misiones puede variar significativamente en distancias relativamente cortas.
- El modelo numérico calibrado de agua subterránea es potencialmente útil como herramienta de predicción. Para demostrar su utilidad, el modelo calibrado fue usado para estimar los efectos potenciales que produciría la construcción de una presa sobre el Río Paraná cerca de Corpus Christi. El modelo desarrollado para este estudio puede también ayudar para la evaluación futura de los efectos potenciales producidos por el desarrollo del recurso de aguas subterráneas y para la evaluación de los efectos potenciales del desarrollo agrícola sobre la calidad del agua a nivel local.

7.2 Elementos recomendados para un programa apropiado de monitoreo y ensayos

El área piloto Itapúa posee relativamente poca explotación de agua subterránea. Anticipando un potencial incremento del desarrollo del recurso de aguas subterráneas, se recomienda considerar el desarrollo de estrategias de monitoreo a largo plazo y la colecta de datos de pozos existentes. Estos dos elementos juntos sirven para retener mejor el análisis de las condiciones existentes y las predicciones de escenarios alternativos.

- Debería desarrollarse una red de monitoreo de niveles de agua subterránea en el Basalto y en las Areniscas. Para el presente análisis, asumimos que el único nivel de agua medido para cada pozo proveía una medida fiable de las condiciones medias a largo plazo. No se tiene posibilidad de probar esta hipótesis con los datos disponibles. La red de monitoreo puede consistir de pozos existentes, pero la clave es que los niveles de agua sean monitoreados regularmente (mensualmente). Los pozos deberán elegirse entre aquellos que posean perfiles geológicos desarrollados por profesionales de ciencias de la tierra. Deberá realizarse el levantamiento de las coordenadas geográficas y elevación de la ubicación de los pozos. Si algunos (o todos) los pozos seleccionados para el monitoreo son pozos para aprovisionamiento de agua potable, entonces los niveles de agua deben medirse bajo condiciones estáticas, lo que probablemente significa 6 horas después de eventos de bombeo.



- Los pozos seleccionados deben equiparse con transductores, para obtener niveles de agua continuos. Aunque los datos mensuales de niveles de agua a largo plazo deberían ser suficiente, se debe tener alguna idea de las magnitudes de fluctuaciones de niveles de agua a corto plazo. Los transductores deberán ser expresados y se debe considerar la posibilidad de cargar datos a distancia.
- Se deben realizar esfuerzos para identificar los mayores ensayos hidráulicos en el área de estudio, con el objetivo de identificar cuales pozos son activos, cuanta agua se puede extraer a largo plazo y de qué unidad hidroestratigráfica extraen agua. Para este análisis, nosotros asumimos que los valores de las tasas de bombeo obtenidos representan un promedio de mediciones continuas y a largo plazo. Los resultados de nuestro análisis sugiere que el bombeo no es un componente significativo del balance hidráulico total. Sin embargo, el bombeo puede ser significativo localmente. Al igual que con los datos de niveles de agua, no tenemos manera de evaluar si nuestra hipótesis respecto a las tasas de bombeo es apropiado.
- Se debe considerar realizar ensayos hidráulicos que se conformen mejor a las condiciones para obtener mejores interpretaciones. No habían datos disponibles para confirmar si las conductividades hidráulicas estimadas durante la calibración del modelo eran representativas. Nosotros tenemos cierta confianza en los resultados de nuestro análisis porque se ajusta relativamente bien a los valores de niveles de agua observados, al menos a escala regional, son obtenidos con valores de conductividad hidráulica que son consistentes con aquellos obtenidos en análisis y modelos previos (aunque nosotros debimos incrementar la recarga sobre el Basalto). Sin embargo, queda el aspecto que no existen buenas estimaciones independientes de conductividad hidráulica/transmisividad.
- Aunque los detalles no se han incluido en este informe, los resultados de ensayos hidráulicos considerados en la validación del modelo fueron analizados con métodos convencionales de interpretación. La información no es suficiente para establecer la relativa validez de los datos de ensayos hidráulicos, sin embargo, es nuestra impresión que los ensayos fueron realizados bajo condiciones no ideales. Los futuros ensayos hidráulicos deben diseñarse teniendo en cuenta el uso de pozos que tienen perfiles geológicos y detalles de construcción. En otra oportunidad podrán usarse pozos con una distribución geográfica mas dispersa en el área de estudio.



Reconociendo que los ensayos hidráulicos pueden representar un esfuerzo significativo, se recomienda realizar ensayos slug, o tipo pulso, en todos los pozos accesibles del área piloto, como una alternativa mas barata. Como el nivel del agua en los pozos es relativamente somera, los ensayos slug, o tipo pulso, podrían realizarse rápidamente. Los ensayos slug, o tipo pulso, nos proveerían una base de datos importante de estimaciones de conductividad hidráulica con una cobertura espacial mas amplia. Asimismo, estos ensayos proveerán permitirán saber inmediatamente si los niveles de agua medidos en un pozo son representativos. Es inevitable que algunos de los pozos instalados en rocas fracturadas sean completados en áreas dónde la red de fracturación está pobremente interconectada, o tiene baja transmisividad. Los niveles de agua de estos pozos no proveerán una impresión confiable de los niveles de agua regionales. Nuestro análisis sugiere que este es el caso para varios niveles de agua que se incluyó en la calibración. Los resultados de ensayos slug, o tipo pulso, proveen una indicación directa de la representatividad de un pozo.

7.3 Recomendaciones para una perforación adicional

En nuestra opinión, se debería considerar adquirir datos adicionales de pozos existentes.

Sin embargo, la información obtenida de pozos adicionales es potencialmente valiosa para completar los datos existentes y corroborar la validez del modelo calibrado. Asumiendo que existieran disponibles fondos para realizar una perforación adicional, recomendamos que el pozo sea instalado en una localidad cerca de las coordenadas E623000 m, N698000 m.

A fin de identificar una ubicación potencial para un pozo adicional, hemos considerado los siguientes factores:

- El pozo deberá estar ubicado en un área donde el basalto es relativamente espeso. El modelo es relativamente sensitivo a las propiedades del Basalto inferior. Por lo tanto, una buen ubicación podría ser un área dónde la arenisca Misiones está cubierta por una capa de Basalto inferior y de Basalto Superior.
- El pozo deberá estar localizado en un área dónde los niveles de agua en la Fm Misiones sea significativamente más alta que el nivel de superficie topográfica. En estas



localidades los requerimientos de bombeo para desarrollos futuros estará disminuido, y el acuífero tiene protección de la contaminación y otras fuentes superficiales; y

- El pozo deberá estar ubicado en un área dónde la cobertura de pozos existentes es relativamente dispersa. Una vista de las Figuras 15 y 16 sugiere que los tres son relativamente pocos pozos de bombeo y de observación en la localización que nosotros proponemos.

Recomendamos que la perforación del nuevo pozo llegue hasta el piso de las areniscas Misiones y que un profesional de ciencias de la tierra esté presente para dibujar el perfil del pozo. Si hay recursos suficientes, se deberá realizar un ensayo hidráulico en las distintas etapas durante la perforación hasta completar la misma. El pozo debe tener un diámetro suficiente para permitir tres pozos de monitoreo, uno en el Basalto Superior, uno en el Basalto inferior y uno en la Arenisca.



REFERENCIAS

- Anderson, M.P., and W.W. Woessner, 1992: **Applied Groundwater Modeling**, Academic Press, Inc., San Diego, California.
- Araújo, L.M., A.B. França, and P.E. Potter, 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.
- ASTM, 1993: Standard Guide for Comparing Ground-Water Flow Model Simulations to Site-Specific Information, ASTM Standard Guide D5490-93, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania.
- Bedinger, M.S., 1987: Summary of infiltration rates in arid and semiarid regions of the world, with an annotated bibliography, United States Geological Survey Open-File Report 87-43, Denver, Colorado.
- Camilloni, I.A., and V.R. Barros, 2003: Extreme discharge events in the Parana River and their climate forcing, *Journal of Hydrology*, 278, pp. 94-106.
- Cooper, H.H., J.D. Bredehoeft, and I.S. Papadopoulos, 1967: Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, *Water Resources Research*, 3(1), pp. 263-269.
- Environmental Simulations, Inc., 2007: Guide to Using Groundwater Vista, Version 5.0, Environmental Simulations, Inc., Herndon, Virginia.
- Farina, S., S. Vassolo, N. Cabral, S. Vera, and S. Jara, 2004: Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica del sistema acuífero Guaraní (SAG) en la región oriental del Paraguay al sur de la latitud 25°30', *XIII Congresso Brasileiro de Aguas Subterraneas*, Cuiabá, Mato Grosso, October 19-22, 2004.
- Freeze, R.A., and J.A Cherry, 1979: **Groundwater**, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Garcia, N.O., and W.M. Vargas, 1996: The spatial variability of runoff and precipitation in the Rio de la Plata basin, *Hydrological Sciences Journal*, 41(3), pp. 279-299.
- 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.
- Harza-latasa-Tecma, 2002: Estudio del Impacto Ambiental de la Presa de Embalse de Propósito Múltiple de Corpus Christi, La Comisión Mixta argentino-paraguaya del río Paraná.



Resumen ejecutivo, (<http://www.comip.org.ar/Resumen%20Ejecutivo.pdf>), Compendio del estudio (<http://www.comip.org.ar/Compendio.pdf>).

Hill, M.C., 1990: Preconditioned Conjugate-Gradient 2 (PCG2): A computer program for solving ground-water flow equations, United States Geological Survey, Water Resources Investigation Report 90-4048, Denver, Colorado.

Hill, M.C., 1998: Methods and Guidelines for Effective Model Calibration, United States Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 98-4005.

Jacob, C.E., 1947: Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 112, paper 2321, pp. 1047-1064.

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.

Rushton, K.R., and K.S. Rathod, 1988: Causes of non-linear step pumping test responses, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21, pp. 147-158.

Spitz, K., and J. Moreno, 1996: **A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling**, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York.

Van Tonder G. J., L. van Sand Wyk, and J. Buys, 1996: Program TRIPOL, Version 1.0, Institute for Groundwater studies, and Water Research Commission, South Africa.

Walton, W.C., 1970: **Groundwater Resource Evaluation**, McGraw-Hill Book Company, New York, New York.

Watermark Numerical Computing, 2004: PEST: Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition.

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.

Zheng, C., and G.D. Bennett, 2002: **Applied Contaminant Transport Modeling**, Second edition, Wiley-Interscience, New York, New York.