



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



PROYECTO PARA LA PROTECCION AMBIENTAL Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL SISTEMA ACUIFERO GUARANI

MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO AREA PILOTO CONCORDIA- SALTO

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

**David Charlesworth
Henri Sangam
Azita Assadi**



**SNC•LAVALIN
International**

Noviembre 2008



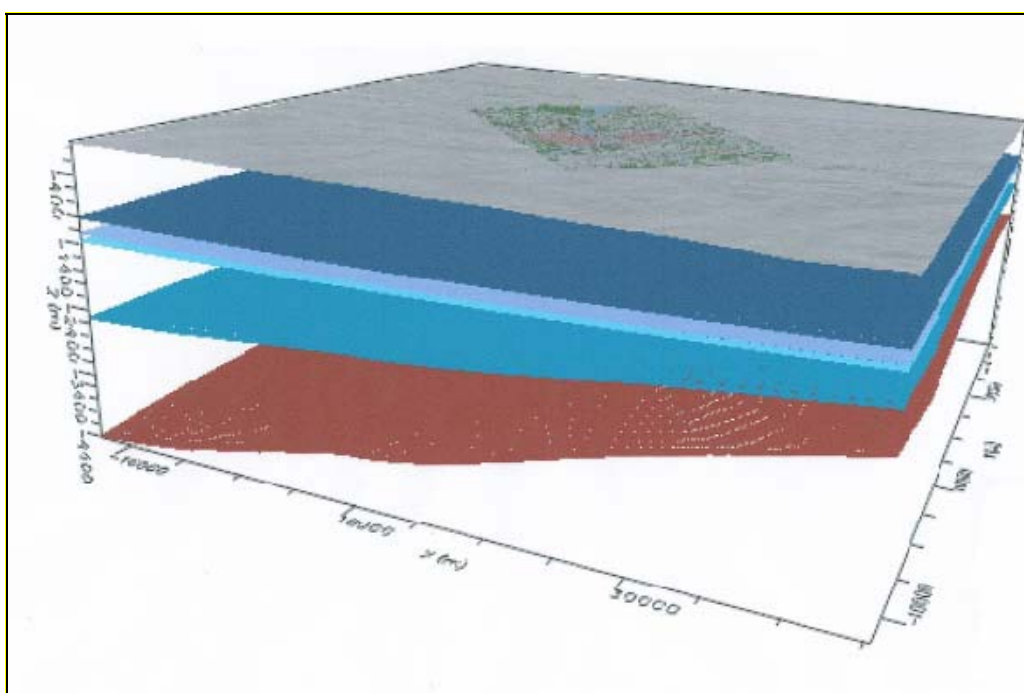
Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní



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 Concordia-Salto

MODELO NUMÉRICO HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA PILOTO CONCORDIA-SALTO



**SNC•LAVALIN
International**



Equipo del Proyecto

Responsables Nacionales:

Por Argentina	Fabián López
Por Brasil	João Bosco Senra
Por Paraguay	Carlos López Dose
Por Uruguay	Víctor Rossi

Coordinadores Nacionales:

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

Representantes OEA:

Jorge Rucks
Carlos Sténeri

Representantes Banco Mundial:

Abel Mejía
Douglas Olson
Samuel Taffesse
Karin Kemper

Secretaría General:

Secretario General	Luiz Amore
Coordinador Técnico	Jorge Santa Cruz
Coordinador Técnico	Daniel García Segredo
Coordinador de Comunicación	Roberto Montes
Asistente técnico	Alberto Manganelli
Auxiliar técnico	Santiago Ferrero
Administración	Luis Reolón
Auxiliar Administrativa	Alejandra Griotti
Secretaria Bilingüe	Mariángel Valdés

Facilitadores proyectos piloto:

Concordia – Salto	Enrique Massa Segui
Rivera – Santana	Achylls Bassedas
Itapúa	Alicia Eisenkölbl
Ribeirão Preto	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	14
1.1	ANTECEDENTES	14
1.2	MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	16
1.3	EL MODELO CONCEPTUAL	17
1.4	EL MODELO INFORMÁTICO.....	17
1.4.1	<i>El código de modelación.....</i>	<i>17</i>
1.4.2	<i>El modelo de cuadrícula</i>	<i>19</i>
1.4.3	<i>Parámetros del modelo.....</i>	<i>19</i>
1.4.4	<i>Condiciones de límite</i>	<i>20</i>
2.0	MODELO CONCEPTUAL PARA CONCORDIA-SALTO	22
2.1	DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL.....	22
2.2	MARCO GEOLÓGICO.....	24
2.3	MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	29
2.3.1	<i>Principales unidades hidroestratigráficas</i>	<i>29</i>
2.3.2	<i>Componentes del acuífero Guaraní.....</i>	<i>30</i>
2.3.3	<i>Estructura geológica del área de estudio.....</i>	<i>31</i>
2.3.4	<i>Sistema de flujo del agua subterránea</i>	<i>32</i>
2.4	PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	34
3.0	EL MODELO NUMÉRICO.....	38
3.1	DOMINIO DEL MODELO Y CONDICIONES DE LÍMITES.....	38
3.1.1	<i>General</i>	<i>38</i>
3.1.2	<i>Enfoque Inicial de Modelación</i>	<i>38</i>
3.1.3	<i>Bordes Verticales del modelo</i>	<i>44</i>
3.2	MODELO EN RÉGIMEN PERMANENTE	44
3.2.1	<i>Cuadrícula del modelo.....</i>	<i>44</i>
3.2.2	<i>Capas del modelo.....</i>	<i>45</i>
3.2.3	<i>Conductividad hidráulica.....</i>	<i>50</i>
3.2.4	<i>Niveles del agua y cargas hidráulicas.....</i>	<i>50</i>
3.2.5	<i>Condiciones de bordes</i>	<i>50</i>
3.2.6	<i>Recarga y ríos</i>	<i>51</i>
3.3	MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO	51
4.0	CALIBRACION DEL MODELO.....	53
4.1	MODELACIÓN DE RÉGIMEN PERMANENTE.....	53
4.2	MODELADO EN RÉGIMEN TRANSITORIO	58
4.2.1	<i>Validación del modelo.....</i>	<i>58</i>



5.0	MODELO PREDICTIVO	61
5.1	OBJETIVOS.....	61
5.2	ESCENARIO 1	61
5.3	ESCENARIO 2	61
5.4	IMPACTOS EN PERFORACIONES EXISTENTES.....	64
5.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	64
5.6	EVALUACIÓN DEL IMPACTO.....	68
6.0	CONCLUSIONES.....	78
7.0	RECOMENDACIONES	80
7.1	ESCASEZ DE INFORMACIÓN	80
7.2	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN A PARTIR DE LAS INSTALACIONES EXISTENTES	81
7.3	NUEVAS INVESTIGACIONES	82
7.4	MODELACIÓN FUTURA.....	83
7.5	DESARROLLO EN ETAPAS.....	83



LISTA DE TABLAS

TABLA 1: HIDROESTRATIGRAFIA BASADA EN LA PERFORACIÓN DEL DAYMAN	28
TABLA 2: VALORES DE TRANSMISIVIDAD A PARTIR DE LOS ENSAYOS HIDRÁULICOS.....	35
TABLA 3: VALORES DE TRANSMISIVIDAD DE OLEAGA & DE LOS SANTOS	36
TABLA 4: CAPAS DEL MODELO	48
TABLA 5: TASAS DE EXTRACCIÓN DE POZOS DE PRODUCCIÓN	52
TABLA 6: RESULTADOS DE SIMULACIÓN FRENTE A RESULTADOS OBSERVADOS PARA EL ENSAYO HIDRÁULICO DE BOMBEO EN LA PERFORACIÓN DAYMÁN	59
TABLA 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN FRENTE A RESULTADOS OBSERVADOS PARA EL ENSAYO HIDRÁULICO DE BOMBEO EN LA PERFORACIÓN KANAREK	59
TABLA 8: RESULTADOS DE SIMULACIÓN FRENTE A RESULTADOS OBSERVADOS PARA EL ENSAYO HIDRÁULICO DE BOMBEO EN LA PERFORACIÓN CLUB-REMEROS	59
TABLA 9: RESULTADOS DE SIMULACIÓN FRENTE A RESULTADOS OBSERVADOS PARA EL ENSAYO DE DESCARGA EN LA PERFORACIÓN VILLA ZORRAQUÍN	59
TABLA 10: BALANCE HÍDRICO EN EL AÑO 40	69
TABLA 11: BALANCE HÍDRICO EN EL AÑO 40	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 EXTENSIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ Y UBICACIÓN DE LAS ÁREAS PILOTO	14
FIGURA 2 SECCIÓN TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA – MODELO SUB-REGIONAL	26
FIGURA 3 SUPERFICIE POTENCIOMÉTRICA	33
FIGURA 4 ENFOQUE INICIAL DE MODELACIÓN - BORDES CON CARGA CONSTANTE	40
FIGURA 5 ENFOQUE INICIAL DE MODELACIÓN – BORDES CON FLUJO CONTROLADO Y CARGA CONSTANTE ...	42
FIGURA 6 CUADRICULA DEL MODELO – RÉGIMEN PERMANENTE	46
FIGURA 7 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EN EL MODELO	49
FIGURA 8 CARGA CALCULADA VS OBSERVADA – RÉGIMEN PERMANENTE	55
FIGURA 9 CARGA CALCULADA SIN POZOS EN OPERACIÓN	56
FIGURA 10 CURVAS PIEZOMÉTRICAS CON ABSTRACCIÓN ACTUAL, LUEGO DE 15000 DÍAS (FRONTERA DE CONTROL DE CARGA)	57
FIGURA 11 CARGA PIEZOMÉTRICA - ESCENARIO 1 (CON 2 POZOS ADICIONALES)	62
FIGURA 12 CARGA PIEZOMÉTRICA - ESCENARIO 2 (CON 7 POZOS ADICIONALES)	63
FIGURA 13 CARGA PIEZOMÉTRICA CON ABSTRACCIÓN ACTUAL - ANÁLISIS 1 DE SENSIBILIDAD (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA REGIONAL, FORMACIÓN RIVERA= 2,4 M/DÍA)	65
FIGURA 14 CARGA PIEZOMÉTRICA CON 2 POZOS ADICIONALES- ANÁLISIS 2 DE SENSIBILIDAD (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA REGIONAL, FORMACIÓN RIVERA= 2,4 M/DÍA)	66
FIGURA 15 CARGA PIEZOMÉTRICA CON 7 POZOS ADICIONALES- ANÁLISIS 3 DE SENSIBILIDAD (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA REGIONAL, FORMACIÓN RIVERA= 2,4 M/DÍA)	67
FIGURA 16 PERFIL ESQUEMÁTICO DE SALTO GRANDE A DAYMAN, MOSTRANDO CARGAS CALCULADAS PARA VARIOS ESCENARIOS	71
FIGURA 17 PERFIL ESQUEMÁTICO DE SALTO GRANDE A DAYMAN, MOSTRANDO CARGAS CALCULADAS PARA VARIOS ESCENARIOS- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	72
FIGURA 18 PERFIL ESQUEMÁTICO ENTRE NORESTE Y SUROESTE - CARGAS CALCULADAS PARA VARIOS ESCENARIOS	73
FIGURA 19 PERFIL ESQUEMÁTICO ENTRE NORESTE Y SUROESTE - CARGAS CALCULADAS PARA VARIOS ESCENARIOS – ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	74
FIGURA 20 UBICACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES EN FIGURAS 18 Y 19	75
FIGURA 21 ABATIMIENTO – ESCENARIO 1, LUEGO DE 15000 DÍAS (CON 2 POZOS ADICIONALES)	76
FIGURA 22 ABATIMIENTO – ESCENARIO 2, LUEGO DE 15000 DÍAS (CON 7 POZOS ADICIONALES)	77



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

The report describes the development of a numerical model for the Concordia-Salto Pilot area, which is known for the thermal spas that have been developed since the discovery of deep thermal groundwater in the area.

A finite difference model, using the MODFLOW numerical simulation code was selected, and a multi-layered model constructed to represent the Guaraní Aquifer System within the pilot area. The aquifer is overlain by a thick basalt sequence that acts as an aquiclude to the sandstones of the Rivera, Tacuarembó and Buena Vista Formations. These range in age from late Permian to Jurassic and represent a sedimentary sequence which developed from primarily fluvial in the early stages to primarily aeolian at the end. The model also included the underlying Paleozoic deposits which act primarily as an aquitard, but with some low-yielding water-bearing units. The top of the Precambrian crystalline basement served as the lower boundary of the model.

The objective of the computer model was to assist in planning the future development of the thermal waters of the cities of Concordia and Salto and the surrounding areas. To this end two development scenarios were simulated, the first representing the addition of two new boreholes and the second representing a total of seven new boreholes. The report concludes that adding seven additional new boreholes to the Concordia-Salto pilot area will lead to further lowering of the piezometric heads and could, under the worst case scenario, lead to loss of artesian flow in some locations. The need for further data collection is noted and it is recommended that consideration be given to the construction of a sub-regional model which extends to the recharge area and incorporates natural hydrogeological boundaries.

El informe describe la elaboración de un modelo numérico para el área piloto Concordia-Salto, la cual se conoce por los baños termales (spas) que se han desarrollado desde el descubrimiento del agua subterránea termal profunda en la región.

Se seleccionó un modelo de diferencia finita, usando código de simulación numérica MODFLOW y se construyó un modelo de capas múltiples para representar el Sistema Acuífero Guaraní en el área piloto. El acuífero está recubierto por una gruesa secuencia de basalto que actúa como acuicludo para las areniscas de las Formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista. El rango de edad de estas formaciones se extiende desde el período Pérmico hasta el Jurásico representando una secuencia sedimentaria que se desarrolló desde un ambiente fluvial en sus comienzos, para terminar en un ambiente principalmente eólico. El modelo incluye también los depósitos Paleozoicos infrayacentes que actúan principalmente como un acuitardo, pero poseen algunas unidades portadoras de agua con bajo rendimiento. El techo del basamento cristalino Precámbrico sirvió como límite inferior del modelo. El objetivo del modelo computado es asistir en la planificación de desarrollo futuro de las aguas termales de las ciudades Concordia y Salto y las áreas aledañas. Se han desarrollado dos escenarios de simulación. El primer escenario incluye la adición de dos nuevos pozos y el segundo escenario representa la adición de siete nuevos pozos. El informe concluye que el agregar siete nuevos pozos al área piloto Concordia-Salto implicaría disminuir más el nivel de cargas piezométricas, lo que en el peor caso, conllevaría una pérdida del flujo artesianos en algunas localidades.

Se nota la necesidad de efectuar una mayor colecta de datos y se recomienda que se considere la construcción de un modelo sub-regional que se extienda hasta el área de recarga incorporando límites hidrogeológicos naturales.



RESUMEN EJECUTIVO

Los Modelos Numéricos son una herramienta para resolver problemas pero no son la solución de los mismos. Los Modelos Numéricos no proporcionan respuestas exactas a problemas insuficientemente definidos. Así como tampoco dispensan mágicamente a los usuarios de su responsabilidad de estudiar cuidadosamente el sistema de aguas subterráneas.

Spitz & Moreno (1996)

Los términos de referencia de este proyecto requerían la construcción de modelos computados para cuatro áreas piloto dentro del Sistema Acuífero Guaraní. Este informe describe la elaboración, calibración, validación y uso del modelo numérico del área piloto denominada Concordia-Salto.

El **Capítulo 1** describe las características físicas del área de estudio y el tipo de modelo numérico usado en el estudio. El área piloto incluye las ciudades Concordia en Argentina y Salto en Uruguay, las cuales están separadas por el Río Uruguay. Ambas ciudades son conocidas por los baños termales (spas) que se han implementado desde el descubrimiento de las aguas subterráneas termales en el área. La mayoría de los spas actuales desarrollados están basados en la existencia de pozos artesianos surgentes que liberan aguas termales con poca o ninguna necesidad de bombeo.

Las aguas termales se obtienen principalmente del Sistema Acuífero Guaraní que consiste en areniscas Triásicas y Jurásicas confinadas por coladas de basaltos suprayacentes que alcanzan espesores aproximados de 1000 m dentro del área de estudio. El acuífero está directamente depositado sobre rocas de edad Pérmica consistentes en una secuencia de limolitas, areniscas finas y limos que aunque contienen agua, son menos permeables que el acuífero suprayacente. Las rocas del Paleozoico sobreyacen en discordancia sobre rocas de baja permeabilidad del basamento cristalino Precámbrico.

El acuífero se recarga aproximadamente a 280 km al este del área piloto, a escala regional el movimiento del agua parece ocurrir en dirección desde el este hacia el oeste, aunque existen variaciones locales en el sentido y dentro del área piloto, el movimiento se realiza principalmente desde el noreste hacia el sudoeste como lo muestra la Figura 3.

Para realizar el Studio, se eligió el programa MODFLOW 2000 como código de simulación numérica. La experiencia en modelación de sitios complejos sugiere que los modelos MODFLOW sirven para simular flujo en sitios complejos, permitiendo simular flujo en estado permanente y en transitorio en forma tridimensional y en una variedad de situaciones simples o complejas.



Para realizar este estudio se seleccionó Visual MODFLOW 4.3 Premium, 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 establece con una cuadrícula de nodos cuadrados o rectangulares. Agregando capas en dirección vertical, estos nodos se hacen cubos tridimensionales o sólidos rectangulares. La cuadrícula del modelo, la entrada de datos y los resultados pueden ser visualizados en planta y en secciones transversales durante el desarrollo de los modelos.

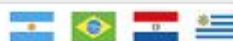
El área piloto Concordia-Salto piloto tiene 19 km de ancho y 26 km de largo y el dominio del modelo fue seleccionado midiendo 45 por 45 km., asegurando que los límites del modelo llegan a sobrepasar los límites del área piloto. Los parámetros que se entran al modelo incluyen: topografía, geología, hidrogeología (superficies superior e inferior del acuífero y acuitardos, conductividad hidráulica) y elevaciones de cursos de agua superficial, aunque éstas últimas no se aplican al caso del modelo de Concordia-Salto, debido al grueso espesor del acuitardo suprayacente.

El **Capítulo 2** introduce el modelo conceptual del área de estudio incluyendo el marco geológico e hidrogeológico. Por medio del análisis de la perforación Daymán, se obtuvo una estimación del espesor de las diferentes unidades geológicas del área piloto. Esta perforación está ubicada en el extremo sur del sector de Salto y es el único pozo dentro del área piloto que penetra completamente los depósitos Paleozoicos y llega al basamento Precámbrico.

La primera unidad significativa, para el propósito del presente estudio es el grueso espesor de basalto de la Formación Serra Geral (también denominado Formación Arapey) que es de edad Cretácica y constituye una capa de muy baja permeabilidad confinante del acuífero subyacente. Para desarrollar este modelo se consideró que el Sistema Acuífero Guaraní incluye los sedimentos de la Formación Rivera, Tacuarembó y Buena Vista, con edades que incluyen desde el Pérmico superior hasta el Jurásico y representan una secuencia sedimentaria que se desarrollada desde estados fluviales en su fase inicial hasta eólicos al final.

El Acuífero Guaraní yace sobre una secuencia de rocas sedimentarias de baja permeabilidad de edad Pérmica, que a su vez yacen sobre el basamento cristalino Precámbrico el cual fue considerado impermeable para los propósitos del modelo, y funciona como bajo acuícludo.

A fin de construir el modelo fue necesario definir ciertas superficies claves de la columna estratigráfica, como ser: el piso del basalto/techo de areniscas; el piso de las areniscas (incluyendo la Fm. Buena Vista); y el piso del Pérmico/techo del Precámbrico. Luego fue necesario construir un mapa de nivel piezométrico del área de estudio, aunque los datos eran limitados, fue posible usando datos de



adentro y de afuera del área piloto. Finalmente se evaluaron los valores de conductividad hidráulica de varias unidades, y el coeficiente de almacenamiento, basados en los datos de ensayos hidráulicos y en datos publicados de varios pozos de la región.

El **Capítulo 3** describe el modelo numérico y presenta los tres enfoques de modelación que fueron evaluados. Los tres enfoques son los siguientes:

1. Modelo con bordes de Carga constante
2. Condiciones de Borde Mixto (carga controlada y flujo controlado)
3. Condiciones de Borde Mixto (Carga controlada y No flujo)

El tercer enfoque de modelación tiene un dominio que se extiende aproximadamente en 45 km X 45. Este enfoque fue seleccionado para permitir que la malla del modelo siga el patrón de flujo de agua subterránea en sentido noreste – suroeste y facilitar la selección de condiciones de bordes de carga controlada y de no flujo.

El **Capítulo 4** describe la calibración del modelo. Inicialmente, se corrió un modelo en régimen permanente sin pozos en operación. La calibración del modelo se realizó por el método de prueba y error comparando las cargas hidráulicas simuladas con las cargas observadas en los pozos y en otros puntos del modelo. Una vez calibrado el modelo en régimen permanente, se usó una versión en régimen transitorio para duplicar los resultados de los ensayos de descarga en cada pozo en que se disponía de datos. Las cargas piezométricas derivadas del modelo en régimen permanente fueron usadas como datos de entrada al modelo en régimen transitorio.

El **Capítulo 5** discute el uso del modelo para predicción de efectos producidos por varios escenarios. El objetivo principal del modelo del área piloto Concordia-Salto es el apoyo a la planificación de desarrollo futuro del aguas termales de las ciudades Concordia y Salto y áreas circundantes. Se desarrollaron dos escenarios, el primero representando la adición de dos pozos nuevos y el segundo escenario representando la adición de siete nuevos pozos. En el primer escenario un pozo futuro se localizó en Concordia y el otro en Salto. Los resultados de las simulaciones son presentados por medio de mapas de curvas piezométricas y como secciones transversales mostrando las cargas piezométricas en los distintos escenarios.

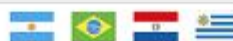
Los resultados también se presentaron según la extensión del cono de depresión resultante por la adición de los nuevos pozos. Los resultados del modelo muestran que la adición de dos nuevos pozos en la porción noreste del área piloto resulta en un cono de depresión que se extiende fuera del área piloto con un abatimiento de aproximadamente 3 m en la esquina noreste del área y aproximadamente



1 m en la esquina suroeste del área piloto. De manera similar, cuando se agregan siete nuevos pozos a los pozos ya existentes, el cono de depresión se extiende fuera del área piloto con abatimientos de aproximadamente 6 m en ambas esquinas noreste y sureste del área piloto.

El **Capítulo 6** presenta las conclusiones del ejercicio de modelación. Se concluyó que la adicción de dos nuevos pozos puede realizarse sin crear mayores impactos, a condición de que no se ubiquen cerca de pozos existentes, aunque habrá algún descenso regional de las cargas piezométricas en el área piloto. Sin embargo, al agregar siete nuevos pozos al área piloto Concordia-Salto llevaría a descender aún mas el nivel de las cargas piezométricas y podría, en el peor caso, producir una pérdida de las condiciones de flujo artesiano en algunas localidades.

El **Capítulo 7** enuncia un número de recomendaciones que emergen del estudio. Las mismas incluyen la necesidad de coleccionar nuevos datos fiables en relación a las cargas piezométricas y a la tasa de abstracción del agua subterránea y se hace notar que una de las limitaciones del presente modelo numérico de Concordia-Salto es el hecho que no hay límites ni bordes naturales dentro del dominio del modelo. Se recomienda que se considere la ejecución de una perforación para investigación para definir mejor la geología y determinar perfiles de permeabilidad a través de las unidades del acuífero. Finalmente, se recomienda que en el futuro, se construya un modelo sub-regional, que se extendería desde el área de recarga en el Este hasta el Oeste, mas allá del área piloto Concordia-Salto.



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 Concordia-Salto ubicada en Argentina y Uruguay, 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 Charlesworth & Associates Consulting Hydrogeologists, de Canadá junto con SNC-Lavalin llevaron a cabo el desarrollo y ejecución del presente modelo numérico.

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.

1.1 Antecedentes

Los Términos de Referencia de este proyecto exigen la construcción de modelos informáticos 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 Concordia- Salto. El nombre se deriva del hecho que el área piloto abarca la frontera entre Argentina y Uruguay e incluye las ciudades de Concordia, del lado argentino de la frontera y Salto del lado uruguayo. El área está dividida por el Río Uruguay que también delimita la frontera internacional entre los dos países (ver Figura 1). La topografía varía entre elevaciones de menos de 10 msnm (metros sobre el nivel del mar) adyacentes al río, hasta más o menos 60 msnm a lo largo de la divisoria de aguas vecinas.



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



Tanto Concordia como Salto son ciudades conocidas por los balnearios (spas) que se han desarrollado desde el descubrimiento de las aguas subterráneas termales en el área. Estas aguas se descubrieron durante la exploración petrolera en el año 1937 y, en la última mitad del siglo veinte, la mayoría de los balnearios actuales se desarrollaron basados en la existencia de los flujos de los pozos artesianos que entregan las aguas termales con poco o casi nada de bombeo.

Los beneficios económicos a las economías locales por el desarrollo de los balnearios han sido significativos y los gobiernos de ambos países están interesados en desarrollar aún más este recurso. Sin embargo, también se reconocen los peligros de la sobre-explotación, lo que podría llevar a la disminución de los flujos y a una pérdida de las ventajas económicas que disfrutaban ambos países en la actualidad.

1.2 Marco Hidrogeológico

Las aguas termales se derivan primeramente del Acuífero Guaraní o del Sistema Acuífero Guaraní (SAG). Las definiciones reales de estos términos son temas de un debate continuo, sin embargo en términos simples se puede decir que el acuífero consiste de una secuencia sedimentaria de areniscas de edad Triásica a Jurásica, recubiertas en el área piloto Concordia Salto por una secuencia gruesa de basalto que actúa como una acuíclusa.

Las areniscas que constituyen el acuífero están directamente subyacidas por las rocas de edad Pérmica que consisten en secuencias de esquistos de lodos, areniscas finas, limos etc., que aunque contengan agua, son menos permeables que el acuífero que lo recubre. Algunas definiciones del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) incluyen estas rocas Paleozoicas como parte del sistema, mientras que otras restringen el término SAG a las areniscas Triásicas y Jurásicas, y algunos otros argumentan que el nombre solo debería aplicarse a las areniscas Jurásicas, que son las unidades principales que contienen agua.

Las rocas Paleozoicas yacen en discordancia por encima de las rocas cristalinas de baja permeabilidad del basamento Precámbrico.

Las aguas termales de los sedimentos Paleozoicos son generalmente salinas, mientras que las aguas termales del acuífero principal (es decir, las areniscas) son generalmente de baja salinidad.



El agua subterránea en el Acuífero Guaraní en el área piloto se recarga a unos 280 km al este, donde aflora el acuífero. Las temperaturas moderadamente altas del agua subterránea en el área piloto son consistentes con el gradiente geotérmico esperado dada la gran profundidad del acuífero.

1.3 El modelo conceptual

Antes de construir un modelo informático se necesita tener el modelo conceptual de la hidrología del área de estudio. Los Términos de Referencia especifican que el modelo de flujo tiene que ser un modelo local, que abarque y se restrinja específicamente al área piloto Concordia-Salto. Sin embargo, para entender el sistema de flujo dentro del piloto fue necesario desarrollar un modelo conceptual sub-regional que se extendió mas allá de los límites del área piloto.

Un modelo conceptual representa una síntesis de la información disponible que, en el presente estudio, fue la base de datos de pozos de agua y las superficies hidrogeológicas derivadas de esa base de datos. La información requerida incluye la topografía, el espesor del acuícludo, el espesor del acuífero y las superficies piezométricas. Además, se incluyó la información disponible de los informes geológicos e hidrogeológicos y la información de los ensayos de descarga.

Los pasos claves para formular el modelo conceptual incluyen la definición de las unidades hidroestratigráficas, la preparación del balance de agua y la definición de los sistemas de flujo del agua subterránea. Sin embargo, el desarrollo de un modelo conceptual, y la construcción de un modelo informático, involucran algún tipo de simplificación y categorización de la información, ya que no es factible la reconstrucción completa del sistema real, con todas sus complejidades. Sin embargo, cuanto más se aproxime el modelo conceptual a la situación del campo, más exacto será el modelo numérico.

1.4 El modelo informático

1.4.1 El código de modelación

Se utilizó el programa MODFLOW 2000 (Harbaugh y otros, 2000) como el código de simulación numérica para el estudio. La experiencia en modelación de lugares complejos sugiere que los modelos MODFLOW diseñados apropiadamente son adecuados para simular



el flujo de agua subterránea en escenarios complejos. El programa MODFLOW es capaz de simular el estado estable y transitorio del flujo tridimensional de agua subterránea en una variedad de escenarios que van desde el más simple al más complejo. Su flexibilidad puede acomodar áreas de hidroestratigrafía variable en tres dimensiones y patrones complejos de flujo en la cercanía de las corrientes y pozos de suministro de agua como también las propiedades heterogéneas de los materiales. El programa MODFLOW tiene muchas opciones para la representación de fuentes y depresiones. Estas opciones soportan la flexibilidad suficiente para representar las características importantes de las áreas de estudio.

MODFLOW se basa en una formulación centrada en bloques de diferencias finitas. Ya que ésta formulación se desarrolló a partir de una exposición local del balance de fluidos, los modelos MODFLOW convergentes son conservativos de masa a nivel local y globales. MODFLOW también mantiene un esquema de interpolación de velocidad simple para el cálculo de rastreo de partículas. El código MODPATH de rastreo de partículas (Pollack, 1994) le proporciona al MODFLOW la capacidad de desarrollar análisis exactos de trayectoria y tiempo de viaje. El programa ZoneBudget (Harbaugh, 1990) sirve para calcular los balance de agua.

El programa Visual MODFLOW 4.3 Premium, desarrollado por la firma Waterloo Hydrogeologic Inc. (WHI, 2003), se escogió como la interfase gráfica del usuario para este estudio porque permite ingresar fácilmente la información, y arroja resultados rápidamente. La cuadrícula del modelo, la incorporación de información, y los resultados pueden visualizarse en vistas planas y secciones transversales en cualquier momento durante el desarrollo de los modelos.

MODFLOW es un modelo centrado en bloques de diferencias finitas que tiene una entrada modular con paquetes o subrutinas separadas para el manejo de ríos, drenajes, evapotranspiración, recargas y pozos. Un programa de computador o un código resuelve una serie de ecuaciones algebraicas generadas por aproximación de las ecuaciones diferenciales parciales (ecuación dominante, condiciones de frontera y condiciones iniciales) que forman el modelo matemático. Las técnicas aproximadas como las de los métodos de diferencias finitas o de elementos finitos operan en el modelo matemático y lo cambian a una forma que puede ser resuelta rápidamente por el computador. El conjunto de ecuaciones algebraicas, representado como la ecuación matriz, se resuelve por métodos numéricos.



1.4.2 El modelo de cuadrícula

El enfoque de la diferencia finita utilizada en MODFLOW involucra la definición del área a ser modelada como una serie de celdas que se alinean en filas, columnas y capas. Este proceso se conoce como la individualización del área modelo y el enfoque de diferencias finitas simula luego las cargas hidráulicas en cada celda, de forma que el volumen de agua que entra en esa celda es igual al volumen que sale de ella. El arreglo de celdas constituye el modelo de cuadrícula.

El modelo se compone de una cuadrícula de nodos, ya sean cuadrados o rectangulares. Al añadir capas en dirección vertical, estos nodos se convierten en cubos tridimensionales o sólidos rectangulares. La cuadrícula horizontal debe ser la misma para cada capa. La selección del espaciamiento nodal es de importancia fundamental pero en el Visual MODFLOW, el espaciamiento nodal puede ajustarse durante el proceso de modelación. En la dirección horizontal se pueden agregar filas y columnas adicionales en áreas donde las elevaciones de las capas se modifican rápidamente o la pendiente de la superficie potenciométrica es muy inclinada.

El cambio en la carga en la dirección vertical afectará la selección del espaciamiento nodal vertical. Una consideración secundaria al seleccionar el espaciamiento nodal es la variabilidad en las propiedades del acuífero. Las capas del modelo generalmente corresponden a las unidades hidroestratigráficas.

Como la modelación puede demandar recursos informáticos significativos relacionados con la memoria utilizada y los tiempos de operación del modelo relacionados a la convergencia, el diseño de la cuadrícula debe realizarse cuidadosamente con el área de la mayor resolución espacial limitada al área de interés inmediato. Al diseñar un modelo cuidadosamente, este puede permanecer regional mientras que se retenga una resolución espacial que sea adecuada para tratar los objetivos del estudio. La ubicación del área detallada del modelo debe estar guiada por el reconocimiento de la ubicación de las tensiones críticas y de los asuntos que se espera que maneje el modelo.

1.4.3 Parámetros del modelo

Los parámetros de entrada al modelo incluyen: la topografía, la geología, la hidrogeología (es decir, las superficies superiores e inferiores de los acuíferos y acuitardos, la conductividad hidráulica) y las elevaciones de las corrientes.



La información se ingresa al modelo en zonas que están compuestas por un grupo de celdas que tienen propiedades similares. De esta manera las propiedades pueden ser variadas espacialmente a través del modelo para aproximar el modelo conceptual que fue desarrollado para el dominio del modelo.

1.4.4 Condiciones de límite

Las condiciones de límites definen cómo el modelo se relaciona con el medio ambiente que lo rodea, tanto lateral como verticalmente, es decir cómo éste interactúa con el área mas allá del dominio del modelo. Los bordes físicos de los sistemas de flujo de agua subterránea están constituidos por formaciones relativamente impermeables, ya sean formaciones de roca o ricas en arcilla, o cuerpos de agua superficiales. Otros bordes se forman como resultado de condiciones hidrológicas, e incluyen las divisorias y flujos laminares de agua subterránea. Las divisorias de aguas subterráneas forman límites hidráulicos cuya ubicación está influenciada por la presencia de rasgos físicos. Los sistemas de flujo poco profundos están separados de los sistemas de flujo profundos por flujos laminares divisorios. Todos los bordes hidráulicos son características transitorias que pueden cambiar de lugar o desaparecer si las tensiones del sistema cambian.

Los límites hidrogeológicas se clasifican en tres tipos:

- | | |
|--------|--|
| Tipo 1 | Carga específica - (condiciones Dirichlet) – la carga se especifica |
| Tipo 2 | Bordes de Flujo específico (condiciones Neumann) – el flujo a través de un borde está dado e incluye un borde sin flujo (flujo cero). |
| Tipo 3 | Bordes de flujo que depende de la carga (condiciones de borde mezcladas o Cauchy) – para las cuales el flujo a través del borde se calcula dando una condición de carga de borde. Esta condición de borde relaciona los bordes de carga con los bordes de flujo. |

En el MODFLOW, todas las opciones para simular las condiciones de borde se pueden usar también en el interior del dominio del modelo para simular fuentes y sumideros de agua o límites internos. Las condiciones dependientes de la carga pueden usarse 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 dependiente de la carga a menudo se



torna un poco confusa porque las mismas opciones del modelo se utilizan para representarlas a ambas. Mas adelante se discuten las condiciones de borde y las fuentes y sumideros internos.

Idealmente, un modelo numérico de flujo de agua subterránea debería extenderse a los límites hidrogeológicos naturales tales como las divisorias de aguas subterráneas. En algunos casos, estos límites naturales están tan alejados del área de interés que no es práctico extender el modelo a un dominio tan grande. En otros casos, la extensión de la influencia de los pozos de bombeo a ser simulados no es conocida con exactitud, de modo que el dominio del modelo tiene que ser inicialmente exagerada con el fin de acomodar estas áreas. No es necesaria la extensión del modelo a límites remotos mientras que el modelo sea lo suficientemente grande para que el efecto de las tensiones (descarga de pozos) en el área de interés no se propague al perímetro del modelo. Si las tensiones afectan las condiciones a lo largo del perímetro del modelo (es decir, conos de extracción en pozos o trayectorias de zonas de captura que se extienden hasta los bordes del modelo), los resultados se verán afectados artificialmente por estas condiciones de borde y el truncamiento del modelo.



2.0 MODELO CONCEPTUAL PARA CONCORDIA-SALTO

2.1 Desarrollo de un modelo conceptual

Domenico (1972) observó que el modelo es una representación de la realidad que trata de explicar el comportamiento de algunos aspectos de esa realidad, y observó que el modelo siempre es menos complejo que el sistema que representa. En la misma línea, Wang & Anderson (1982) afirmaron que un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad.

Un modelo conceptual es sencillamente un entendimiento de los procesos que constituyen un sistema real; en el contexto hidrogeológico, esto equivale a un entendimiento del sistema de flujo del agua subterránea. Un modelo matemático de agua subterránea es un intento de tomar ese entendimiento del sistema de flujo y convertirlo en términos matemáticos.

Para desarrollar un modelo matemático es necesario entender primero claramente la incidencia y el movimiento del agua subterránea en el área de interés, es decir, es necesario desarrollar un modelo conceptual que identifique los procesos relevantes y los elementos físicos que controlan el flujo de agua subterránea en el acuífero. El modelo conceptual determina por lo tanto, qué cantidad del mundo real se transfiere al modelo matemático.

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 solo 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 un amplio rango de información.

Los pasos en el proceso general de modelación se pueden resumir así:-

- Definición de los objetivos
- Recopilación y análisis de la información
- Entendimiento del sistema de flujo- es decir, desarrollar el modelo conceptual
- Convertir el modelo conceptual en el modelo informático



La recopilación de información obviamente depende de un número de factores específicos del sitio como son la amplitud de trabajos previos y el alcance y presupuesto para nuevas investigaciones de campo. Generalmente se incluye la siguiente información, si se encuentra disponible:-

- Informes publicados que describan la geología e hidrología regional
- Informes sobre investigaciones hidrogeológicas locales (por ejemplo, trabajos de consultores, académicos y entidades de gobierno)
- Mapas topográficos y geológicos publicados; fotos aéreas
- Registros de perforaciones para monitoreo, perforaciones productivas o exploratorias (incluyendo perforaciones de exploración de petróleo, gas y minerales)
- Documentos de investigación, tesis doctorales y de maestrías
- Información del nivel de agua subterránea de pozos de monitoreo y pozos productivos (niveles estáticos y de bombeos)

Para alcanzar un entendimiento satisfactorio del sistema de flujo es necesario contar con un número suficiente de perforaciones distribuidas en toda el área de estudio para poder caracterizar la estratigrafía, las litologías, y las profundidades del techo y piso de las unidades a ser incluidas en el modelo matemático.

Para completar el desarrollo del modelo conceptual es preferible tener un número suficiente de pozos o piezómetros para determinar los gradientes hidráulicos horizontales y verticales en el área y permitir una evaluación de las variaciones estacionales y a largo plazo de los gradientes. También debería haber pozos que hayan sido, o puedan ser, bombeados para ensayos para determinar las propiedades hidráulicas de los acuíferos (y acuitardos) tales como la transmisividad, la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, y su porosidad eficaz.

También es necesario obtener una evaluación de los mecanismos de recarga y descarga dentro del área, incluyendo los registros de abstracción de pozos operativos. Uno de los desafíos en el desarrollo del modelo sub-regional para esta área es que hay grandes zonas



dentro del centro del área de estudio con pocas o ninguna perforación que penetre al sistema acuífero y, de las perforaciones que están disponibles, hay muy poca información que relacione los ensayos hidráulicos y las características del acuífero.

En términos hidrogeológicos el modelo conceptual es una interpretación o descripción activa de las dinámicas del sistema hidrogeológico físico. La importancia del modelo conceptual, sin embargo, no puede exagerarse ya que es un paso crítico en el proceso de modelación de agua subterránea. Si la conceptualización del ambiente hidrogeológico es incorrecta, entonces los resultados del modelo (es decir el modelo informático) también serán incorrectos.

El modelo conceptual consolida la información geológica, hidrológica e hidrogeológica para el área de estudio en un conjunto de suposiciones y conceptos que pueden expresarse de manera cuantitativa. Estos pueden entonces ser ilustrados utilizando planos topográficos, diagramas y secciones transversales.

Marco Geológico. El marco geológico describe la distribución, la configuración y la estructura física de los acuíferos subyacentes y 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.

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 medio poroso o flujo de fractura); los límites hidráulicos, los gradientes verticales e hidráulicos; las cargas hidráulicas y su variación con el tiempo; el movimiento del agua subterránea; la ubicación de las áreas de recarga y descarga del agua subterránea; y la existencia y estabilidad de las divisorias de agua subterránea dentro del área.

Propiedades Hidráulicas. Estas incluyen la transmisividad, conductividad hidráulica, almacenamiento, y la porosidad eficaz. Además es necesario considerar la heterogeneidad y la anisotropía de los acuíferos a lo largo del dominio del modelo.

2.2 Marco geológico

Los depósitos superficiales en Concordia-Salto, que en algunos lugares constituyen un acuífero, no son parte del estudio actual y no fueron considerados en el desarrollo del modelo conceptual (tampoco se incluyeron como una capa separada en el modelo numérico). Esto se



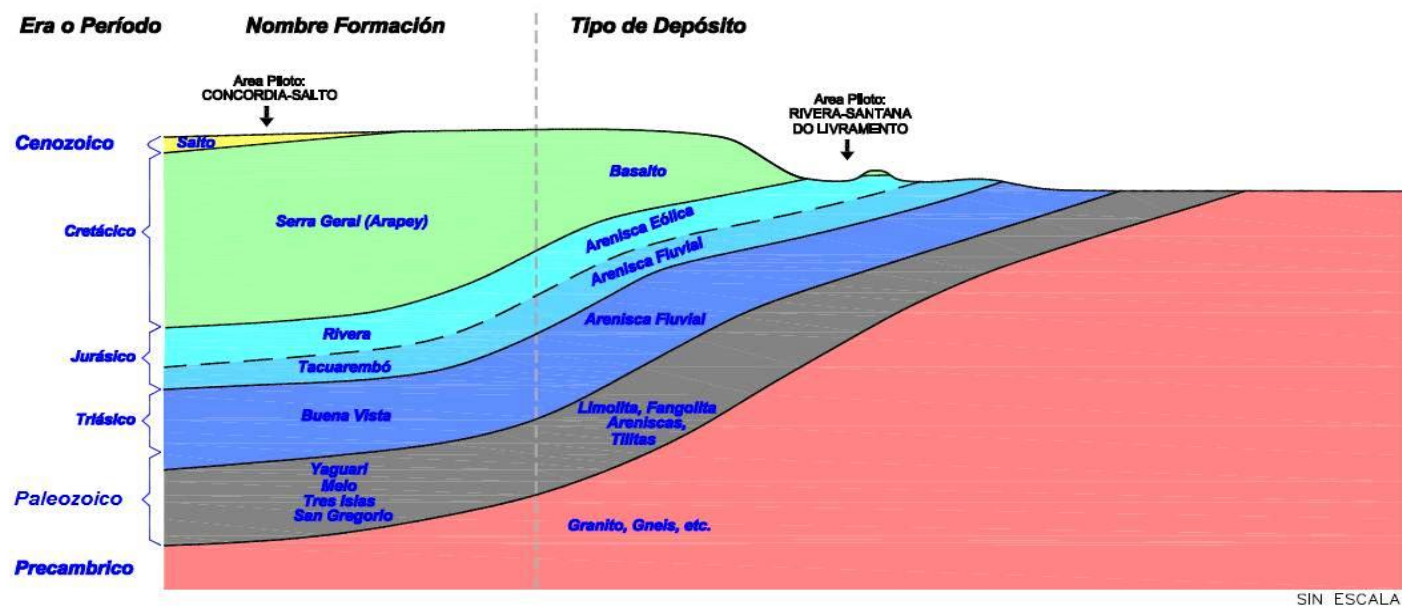
consideró un enfoque razonable ya que parecía no tener participación alguna en la incidencia y el movimiento del agua subterránea en el Acuífero Guaraní en el área piloto de Concordia-Salto. Además, están separados del Acuífero Guaraní por cientos de metros de basaltos de baja permeabilidad, una parte significativa de los cuales constituyen un acuicludo. En la Figura 2 se puede ver una sección transversal geológica simplificada que se extiende desde el área de recarga hasta el área piloto Concordia-Salto. Esta sección transversal no está a escala y no muestra las características estructurales tales como las fallas o los corrimientos.

Para una descripción detallada del modelo conceptual el lector debe remitirse al Informe Hidrogeológico del Área Piloto Concordia-Salto (SNC-Lavalin, 2008); sin embargo en resumen se puede decir que la geología bajo el área de estudio consiste en una secuencia de basalto grueso de la Formación Serra Geral (o Arapey), que es de la era Cretácica y recubre las rocas de las Formaciones Rivera y Tacuarembó (anteriormente clasificadas como los miembros superior e inferior de la Formación Tacuarembó) que son principalmente de edad Jurásica.

La Formación Rivera consiste principalmente de areniscas finas a medianas, bien clasificadas, rojas a marrones que son de origen eólico. De acuerdo con Pesce (2002) las rocas de la Formación Tacuarembó, que subyacen a la Formación Rivera, son principalmente de tipo fluvial (es decir, de cuencas de ríos, de planicies aluviales, y depósitos desbordados), que consisten en granos finos a medianos, bien o regularmente clasificados de feldespatos, cuarzos y areniscas micáceas con cemento arcilloso, y limolitas y fangolitas verdes y rojizas, lulitas moscovitas desmenuzables, y conglomerados intra-formacionales.



Figura 2
SECCIÓN TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA - MODELO SUB-REGIONAL





En discordancia por debajo de la Formación Tacuarembó hay rocas de la Formación Buena Vista que probablemente son de la era Pérmica tardía o Triásica. No hay un consenso completo sobre la edad de esta formación, ya que algunos escritores la describen como totalmente de edad Triásica, y otros la ubican en el Pérmico tardío o el Triásico temprano (de Santa Ana y demás, 2006). Recientemente (Piñeiro y demás, 2007) concluyeron que la formación es de la era Permo-Triásica. Las rocas son principalmente areniscas rojas a blancas con fangolitas, conglomerados y lentes de arcilla.

La secuencia de deposición desde el Pérmico tardío hasta el Jurásico es principalmente fluvial, deltaica y lacustre desde el principio y se convierte en eólica con el tiempo.

La Formación Buena Vista está subyacida, probablemente concordantemente en algunas áreas, por limolitas y areniscas grises de la Formación Yaguarí que dan lugar a depósitos Pérmicos de granos más antiguos y generalmente de granos más finos (por ejemplo los Grupos Tres Islas y San Gregorio) y, al menos en algunos lugares, a rocas de las eras Carbonífera y Devónica. Estas rocas paleozoicas recubren las rocas cristalinas del basamento Precámbrico.

Se puede obtener una evaluación del espesor de las varias unidades geológicas dentro del área piloto, a partir de la perforación Dayman, que se encuentra en los alrededores de la zona sur de la ciudad de Salto, y es la única perforación dentro del área piloto que penetra completamente los depósitos Paleozoicos y alcanza el basamento Precámbrico. La Tabla 1 resume el registro geológico de esa perforación y muestra las profundidades en las cuales se encontraron las diferentes unidades.

Debe tenerse en cuenta que de Santa Ana et al. (2006) en su interpretación de esta perforación han identificado que los primeros 90 metros de depósitos Jurásicos que yacen encima de la Formación Buena Vista como parte de la Formación Itacumbú. Aunque de interés en términos de la clasificación geológica, esto no produce ningún cambio significativo a la interpretación para los fines de la modelación del agua subterránea.



Tabla 1: Hidroestratigrafía basada en la perforación del Dayman

Profundidad	Descripción desde el registro de la perforación	Interpretación utilizada en el modelo numérico	Edad	Conductividad Hidráulica m/d
0 a 955	Basalto en lotes(masivo a cavernoso) con pequeñas intercalaciones de arenisca de menos de un metro. Niveles importantes de derrumbe se presentan probablemente por la alteración del basalto y/o fracturas (principalmente indicado entre los 80 y 100 m y los 420 y los 470 m.		Cretaceo	k=0
955- 1145	Arenisca fina, granos angulares, con estratificación entrecruzada, de color rosa, se presentan niveles de derrumbe de arenisca	Formación Rivera	Jurásico	$K_h=0,6$ $K_v=0,06$
1145- 1240	Areniscas rosa claro, con grano fino con estratos de granos medianos, bien redondeadas. se presentan niveles de limo. En la base los colores varían hasta el rojo, el tamaño del grano es muy	Tacuarembó		$K_h=0,3$ $K_v=0,003$
1240-1487	fino (tope de la Formación Buena Vista por Santa Ana et al, 2006)	Formación Buena Vista	Triásico	$K_h=0,1$ $K_v=0,01$
1487- 1663	Limos muy rojos, con arena muy fina y algo de arcilla. El limo presenta lotes de mica		Permiano (notese que hay posibilidad de sedimentos Paleozoicos mas antiguos debajo del Permiano)	
1663- 1871	Limo gris, un poco limoso, muy duro; con niveles de arena muy finos	Yaguari (sedimentos costeros)		
1871- 1932	fangolitas gris oscura y arcilla dura, con zonas (?)fangosas. Se presentan niveles calcáreos	Grupo Melo (marino)		$K_h=0,01$ $K_v=0,001$
1932- 2004	Arcilla muy dura gris oscura, fangolita, con nodulos de pirita. A los 1960 comienza a presentar bordes tilíticos. Hay niveles calcáreos y presencia de fósiles.	de poca profundidad)		
2004-2178	Tilita muy dura con matriz arcillosa. Hay arena de grano fino color gris claro	Tres Islas San Gregoria (Glacial)		
2178-2204	Filitas verdes y marrones, lutitas, mucha clorita, calcita y cuarzo	Basamento	Precámbrico	k=0

No está a escala. El área coloreada se considera SAG con la Formación Rivera como la unidad contenedora de agua mas importante.



2.3 Marco Hidrogeológico

2.3.1 Principales unidades hidroestratigráficas

Para los fines de este estudio de modelación se considera que el Acuífero Guaraní está compuesto de areniscas de las Formaciones Rivera y Tacuarembó (de la edad Jurásica) y la subyacente Formación Buena Vista, que corresponde a la edad Pérmica tardía.

Para los fines de este estudio la primera unidad significativa, es el basalto grueso de la Formación Serra Geral (también llamada Formación Arapey) que es de edad Cretácica y constituye una capa confinante de muy baja permeabilidad para el Acuífero Guaraní subyacente. Esto se confirmó en el área piloto Concordia-Salto por las altas cargas artesianas que mostró el acuífero subyacente que, en algunos lugares, exceden los cincuenta metros sobre el nivel del terreno.

De este modo la función del basalto en el marco hidrogeológico es el de acuícludo superior al SAG, y la función de la base del basalto (y el techo de la Formación Rivera) es servir de límite o frontera del acuífero Guaraní. Se reconoce que hay una escuela de pensamiento que está en contra del uso del término “acuícludo” basándose en que ninguna unidad es totalmente impermeable; sin embargo para simplificar el sistema para hacer la modelación, la palabra “acuícludo” sirve para distinguir entre las formaciones de permeabilidad extremadamente bajas y las formaciones de permeabilidad baja.

Dejando de lado por un momento, las unidades de areniscas del SAG, el siguiente componente significativo del marco hidrogeológico es el techo del Grupo Yaguarí. Se considera que este estrato marca el límite inferior del SAG, como se define para los propósitos de la modelación en el presente estudio, y el techo de la secuencia de rocas sedimentarias de permeabilidad generalmente baja de la edad Pérmica. Aunque hay algunas unidades dentro de la secuencia Pérmica que, donde aparecen a poca profundidad, pueden ser explotadas con fines de suministro de agua a pequeña escala, la secuencia en su totalidad puede considerarse como un acuitardo en comparación con el Acuífero Guaraní. Se exceptúan las areniscas Tres Islas (Gilboa, 1976) que, en el afloramiento, tienen una producción de alrededor de 2 m³/h de agua, y partes de la San Gregorio, que producen hasta 40 m³/h (Collazo y demás, 2007).



Finalmente, las rocas Pérmicas, y en algunas áreas las rocas Devónicas y Carboníferas, se apoyan en discordancia sobre el basamento cristalino Precámbrico que, para los propósitos de la modelación, se considera impermeable y por lo tanto funciona como acuícludo inferior.

2.3.2 Componentes del acuífero Guaraní

Como se señaló anteriormente, para los propósitos de este ejercicio de modelación se considera que el Sistema Acuífero Guaraní incluye los sedimentos de las Formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista, las que varían en edad desde el Pérmico tardío hasta el Jurásico y representan una secuencia sedimentaria que se desarrolló desde principalmente fluvial en las primeras etapas, hasta principalmente eólica hacia el final. Una revisión de la bibliografía indica que la **Formación Rivera** (anteriormente llamada Miembro Superior de la Formación Tacuarembó) es en general la unidad más permeable y constituye el mayor componente contenedor de agua del SAG debido a la naturaleza bien clasificada de las areniscas eólicas de grano medio. En comparación, las rocas de la **Formación Tacuarembó** (anteriormente descritas como el Miembro Inferior de esa formación) subyacente depositadas bajo condiciones fluviales y con un componente de granos finos (algunos limos) constituyen de esta manera un acuífero de producción mas bien algo baja.

La unidad más baja del SAG, como fue definida para los propósitos de este ejercicio de modelación, es la **Formación Buena Vista** que subyace a la Tacuarembó y que tiene una menor permeabilidad debido al predominio de limos, arenas finas y algo de arcilla. Dentro del área piloto esta unidad por lo general no se tiene en cuenta para el suministro de agua debido a su profundidad y por el hecho de que puede obtenerse agua adecuada de la Formación Rivera a una profundidad algo menor.

En resumen, la secuencia deposicional del Acuífero Guaraní, desde el Pérmico tardío al Jurásico Superior fue inicialmente predominantemente fluvial, lacustre cambiando a eólica hacia el techo de la secuencia. Este cambio en la naturaleza de los depósitos se refleja en las características de contención de agua, siendo el acuífero más permeable a medida que se acerca hacia el tope de la secuencia (es decir la Formación Rivera).



2.3.3 Estructura geológica del área de estudio

Habiendo identificado las unidades estratigráficas presentes en el área piloto fue necesario determinar su distribución tridimensional a través de esta área y se reconoció que esto necesitaba hacerse a nivel sub-regional, debido a la información limitada que existe en el área piloto. Sin embargo, desde el principio de la modelación informática el modelo conceptual sub-regional aún estaba siendo desarrollado y entonces se usó la información estratigráfica de los ocho pozos ubicados dentro del área piloto, junto con algunos mapas geológicos y secciones transversales e información geofísica (Fondo de Universidades), para desarrollar un modelo conceptual preliminar que fue a su vez utilizado para preparar el modelo preliminar de flujo. Esto se hizo independientemente del desarrollo del modelo conceptual regional con el fin de permitir que comenzaran los trabajos de la modelación informática. Una vez se finalizó el modelo conceptual sub-regional completo las superficies de ese modelo se importaron al modelo informático y se llevó a cabo la calibración final.

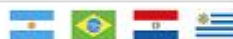
En resumen, las siguientes son las superficies claves en el ejercicio mencionado arriba:-

- Piso del basalto/ techo de la arenisca
- Piso de la arenisca (incluyendo la Fm. Buena Vista)
- Piso del Pérmico/techo del Precámbrico

Estas tres superficies definieron las siguientes unidades:-

- Formación Serra Geral (Arapey) – es decir el acuícludo superior
- Las Formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista – es decir el Acuífero Guaraní
- Los depósitos Pérmicos – es decir el acuitardo y las unidades acuíferas de baja producción
- El Precámbrico – es decir el acuícludo subyacente

En términos del espesor de las unidades del acuífero, las superficies mencionadas arriba definen el espesor total de todo el SAG, y no las unidades individuales. El espesor total tiene un valor promedio dentro del modelo conceptual sub-regional aproximadamente 500 metros, pudiendo exceder los 700 metros.

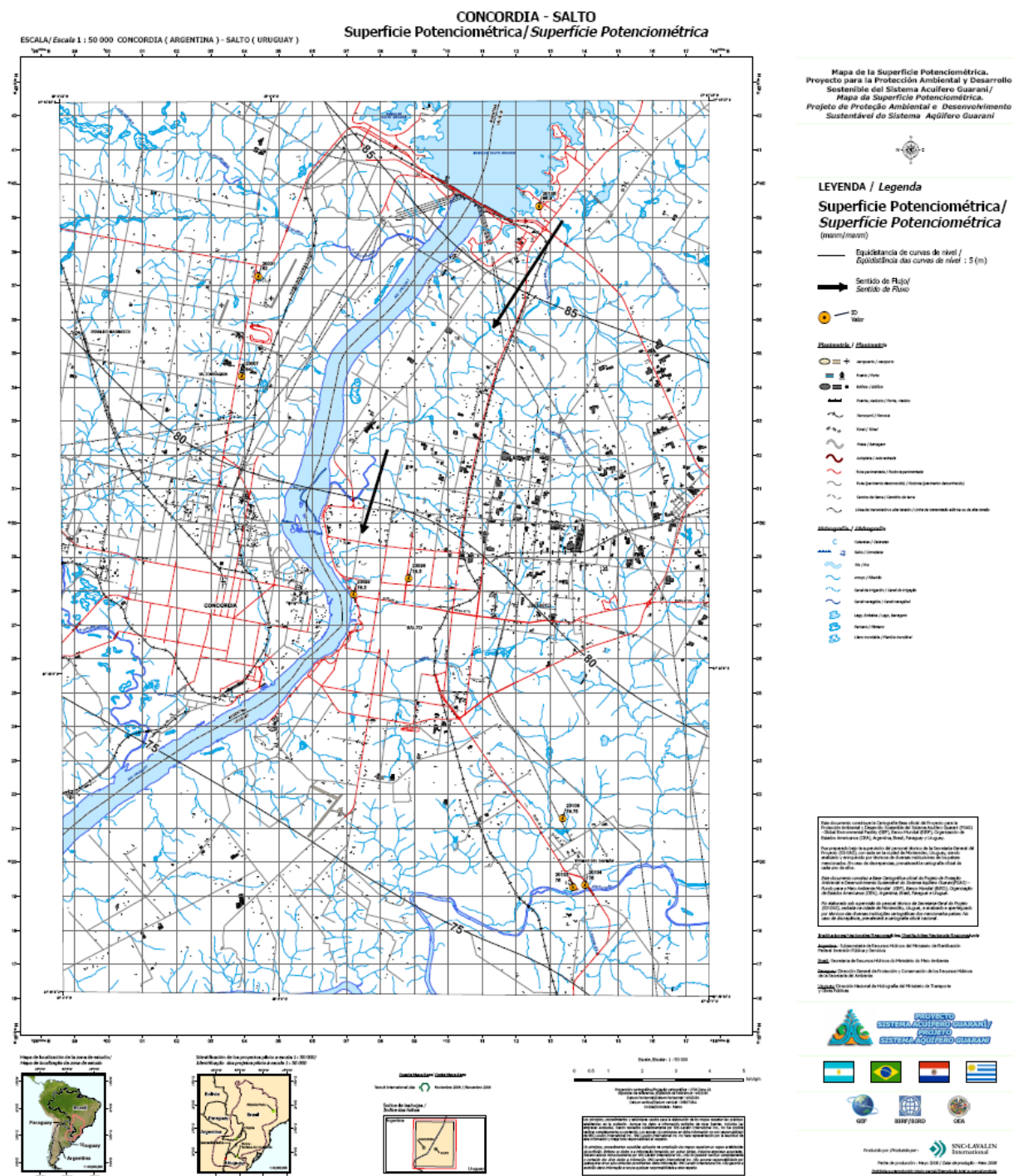


En términos de las unidades individuales la Formación Rivera se ha mencionado que tiene un espesor de 65 metros en el área de recarga, comparada con las Formaciones Tacuarembó y Buena Vista, que son descritas con un espesor de 100 metros (Collazo y demás, 2007). Sin embargo, como se discutió anteriormente, dentro del área piloto Concordia-Salto la interpretación del registro de la perforación de Daymán indica un espesor de 190 metros para la Formación Rivera y 95 metros para la Formación Tacuarembó. En contraste, la Formación Buena Vista tiene más de 420 metros de espesor.

Para los propósitos de la modelación los espesores relativos de las tres unidades del acuífero, como se ven en la perforación Daymán, se han mantenido dentro del dominio del modelo.

2.3.4 Sistema de flujo del agua subterránea

Hay escasez de información confiable de carga piezométrica dentro y alrededor del área de estudio, debido al número relativamente pequeño de pozos existentes y a la dificultad para obtener lecturas confiables en los pozos artesianos con cargas piezométricas de decenas de metros por encima del nivel del terreno. Sin embargo, a partir de la información que estaba disponible fue posible construir un mapa de curvas piezométricas del área de estudio, el que se muestra en la Figura 3. Se reconoce que en alguna ubicación dada habrá inconsistencias y que los valores no deben ser tomados literalmente; sin embargo, se estima que las curvas en esa figura son una representación razonable de la dirección general del flujo de agua subterránea dentro de las unidades principales de areniscas del Acuífero Guaraní en el área Concordia-Salto.





En términos del movimiento real del agua subterránea es claro que la mayoría del movimiento de agua subterránea tiene lugar dentro de las Areniscas Triásicas- Jurásicas (es decir del Acuífero Guaraní) en vez de dentro de los depósitos Paleozoicos subyacentes. Además, aunque hay puntos de vista conflictivos sobre qué partes exactamente de las areniscas corresponden a las Formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista, es probable que la parte más permeable de la secuencia de areniscas sea la parte superior que fue depositada bajo condiciones eólicas, en lugar de las formaciones más bajas (Tacuarembó y Buena Vista) que típicamente representan más los ambientes fluviales y lacustres. De ese modo la mayoría del movimiento del agua subterránea ocurrirá dentro de la Formación Rivera.

A escala regional, el flujo de agua subterránea aparentemente presente en dirección este a oeste, aunque hay variaciones locales en los patrones y, dentro del movimiento del área piloto, va principalmente del noreste al suroeste, como se muestra en la Figura 3.

2.4 Propiedades hidráulicas

Conductividad hidráulica y transmisividad

Las características del acuífero son una parte importante en cualquier modelo y el ejercicio actual ha mostrado que el modelo es sensible a las variaciones en la conductividad hidráulica. En el área de estudio se desarrollaron algunos ensayos hidráulicos de bombeo, como parte del presente estudio o en investigaciones anteriores.

Los ensayos más recientes suministraron información de valor cuestionable para determinar las características del acuífero, debido a un número de problemas logísticos relacionados con los pozos operativos y con la determinación exacta de cargas piezométricas. Sin embargo, la información fue analizada al principio del ejercicio de modelación, junto con la información de ensayos anteriores en las perforaciones de Daymán y Kanarek, y las transmisividades calculadas se presentan en la Tabla 2. También se presentan los valores de la conductividad hidráulica basados en el espesor supuesto de la unidad principal contenedora de agua (200 m). El programa Visual MODFLOW requiere el ingreso de los valores de conductividad y el preprocesador convierte luego estos valores en transmisividades.



Tabla 2: Valores de transmisividad a partir de los ensayos hidráulicos

Perforaciones		Información utilizada	T m ² /d	Conductividad hidráulica m/d	Comentarios
Bombeo	Observación				
Kanarek	-	Abatimiento	117	0,6	
Kanarek	-	Recuperación	114	0,6	
	Dayman	Recuperación	107	0,5	
Dayman	-	Abatimiento	198	1,0	
	Kanarek	Abatimiento	101	0,5	
Club Remeros		Recuperación	16,5	0,8	Información de pobre calidad
	OSE	Abatimiento	198	1,0	Información de pobre calidad
Zorraquin	-	Recuperación	80	0,4	
Vertiente			154	0,8	

Aunque la información de los ensayos hidráulicos no es muy buena, incluyendo los ensayos en Dayman y Kanarek, los resultados se pueden utilizar para tener una indicación de la permeabilidad del acuífero. El promedio de todos los valores de conductividad hidráulica mencionados arriba es de 0,68 m/d y, si se elimina la mayor parte de la información cuestionable (Club Remeros t OSE) el promedio es de 0,62 m/d.

Además de los ensayos hidráulicos mencionados arriba, se utilizaron los resultados de trabajos anteriores realizados por Oleaga & de los Santos (2003). Ellos analizaron la información que había sido recopilada en un período de varios años, principalmente de ensayos de recuperación en perforaciones dentro y alrededor del área piloto. En la Tabla 3 se presentan los valores de transmisividad calculados por ellos para las perforaciones dentro del área piloto, al igual que los valores equivalentes de conductividad hidráulica.



Tabla 3 Valores de transmisividad de Oleaga & de los Santos (2003)

Perforación	T m²/d	Conductividad hidráulica m/d
Hotel Quiroga	141	0,7
OSE	70; 112; 114; 111	0,35; 0,6; 0,6; 0,6
Posada del Siglo XIX	130	0,65
Dayman	82; 67; 89; 90	0,4; 0,3; 0,45; 0,45
Kanarek	115	0,6
Range Salto	67 - 141	0,35 – 0,7

Los valores de conductividad hidráulica, que se calcularon utilizando un espesor estimado de 200 m para la unidad primaria del acuífero, varían entre 0,3 y 0,7 m/d y muestran una gran similitud con los resultados que se presentan en la Tabla 2. A pesar de las dificultades al desarrollar los ensayos de descarga en el área Concordia-Salto, debido a la naturaleza del acuífero y las perforaciones, ha sido posible obtener una apreciación del rango de valores y estos muestran un grado significativo de consistencia.

Se hicieron, por su puesto, muchas suposiciones al calcular estos valores, y hay un número de oportunidades para errores potenciales. Por ejemplo, como lo afirmó Sracek y Hirata (2002), los valores de conductividad hidráulica informados en la mayoría de los estudios sobre este acuífero, no toman en cuenta la densidad del agua y las correcciones de viscosidad-temperatura que, estrictamente hablando, deberían aplicarse cuando se trata de aguas termales. Ellos notan que con temperaturas de agua tan altas como 60° C el error en el cálculo de la conductividad hidráulica, si se basa en una temperatura supuesta de 25° C, estaría por encima de 70%. Basándose en esto, ellos concluyen que los valores informados para la conductividad hidráulica en las partes profundas y confinadas del acuífero usualmente son excesivos.

Sin embargo luego de revisar la información disponible se concluyó que, para la conductividad hidráulica regional, un punto de partida razonable para el modelo sería asignar un valor de 0,6



m/d para la unidad principal contenedora de agua, es decir la Formación Rivera. En la sección 3.2.3 se analizan los valores para las unidades subyacentes.

Almacenamiento

Los modelos temporales requieren la entrada de valores de almacenamiento específico. En un acuífero confinado el coeficiente de almacenamiento específico es esencialmente el almacenamiento dividido por el espesor del acuífero. Basándose en información bibliográfica sobre almacenamiento (por ejemplo, Oleaga & de los Santos, 2003) e información de los ensayos hidráulicos en el presente proyecto (SNC-Lavalin, 2008) se ingresó al modelo un valor de coeficiente de almacenamiento específico de $5E-7$ para las unidades del SAG y de $9E-9$ para el Pérmico. Durante la calibración y validación se hicieron algunos ajustes en las cercanías de los pozos para los cuales existía información sobre ensayos hidráulicos y se encontró que los valores en el rango de $1,4E-6$ a $8E-8$ proporcionaron un buen ajuste en las áreas locales.



3.0 EL MODELO NUMÉRICO

3.1 Dominio del modelo y condiciones de límites

3.1.1 General

El paso inicial en el ejercicio de modelación es determinar la extensión del dominio del modelo enfatizando la selección de límites apropiados para el modelo. La extensión del modelo es usualmente más grande que el área primaria de estudio, con el fin de tratar el tema de las condiciones de borde.

La selección de condiciones de borde apropiadas es crucial para el desarrollo de un modelo exacto y, donde sea posible, es preferible utilizar características físicas naturales. Los límites hidrológicos naturales que restringen a los sistemas de flujo incluyen las divisorias geológicas, divisorias de aguas superficiales y divisorias de aguas subterráneas.

En el caso del área piloto Concordia-Salto, dado el escenario geológico de un enorme acuífero confinado sin ninguna división natural obvia dentro de las cercanías del área piloto, se seleccionaron límites arbitrarios para el dominio del modelo, con la condición de que el dominio fuera lo suficientemente grande para evitar el efecto de tensiones en el perímetro del modelo y evitar los conos de influencia de los pozos de extracción que se extienden a los bordes durante la modelación (a menos que el límite represente un límite hidrogeológico real, lo que es improbable en Concordia-Salto).

3.1.2 Enfoque Inicial de Modelación

La modelación de agua subterránea es un proceso interactivo, en el que se asumen varios enfoques e hipótesis que se prueban para corroborar si los resultados del modelo son razonables basados en las hipótesis asumidas. Para el área piloto de Concordia-Salto se utilizaron tres enfoques diferentes de modelación con variaciones en las condiciones de borde de cada enfoque, así como variaciones en la distribución de las células activas dentro del dominio.

Los tres enfoques utilizados son los siguientes:

1. Modelo con bordes de carga constante (controlada)
2. Condiciones de bordes Mixtos (carga constante (controlada) y flujo controlado)



3. Condiciones de borde Mixto (carga constante y no flujo)

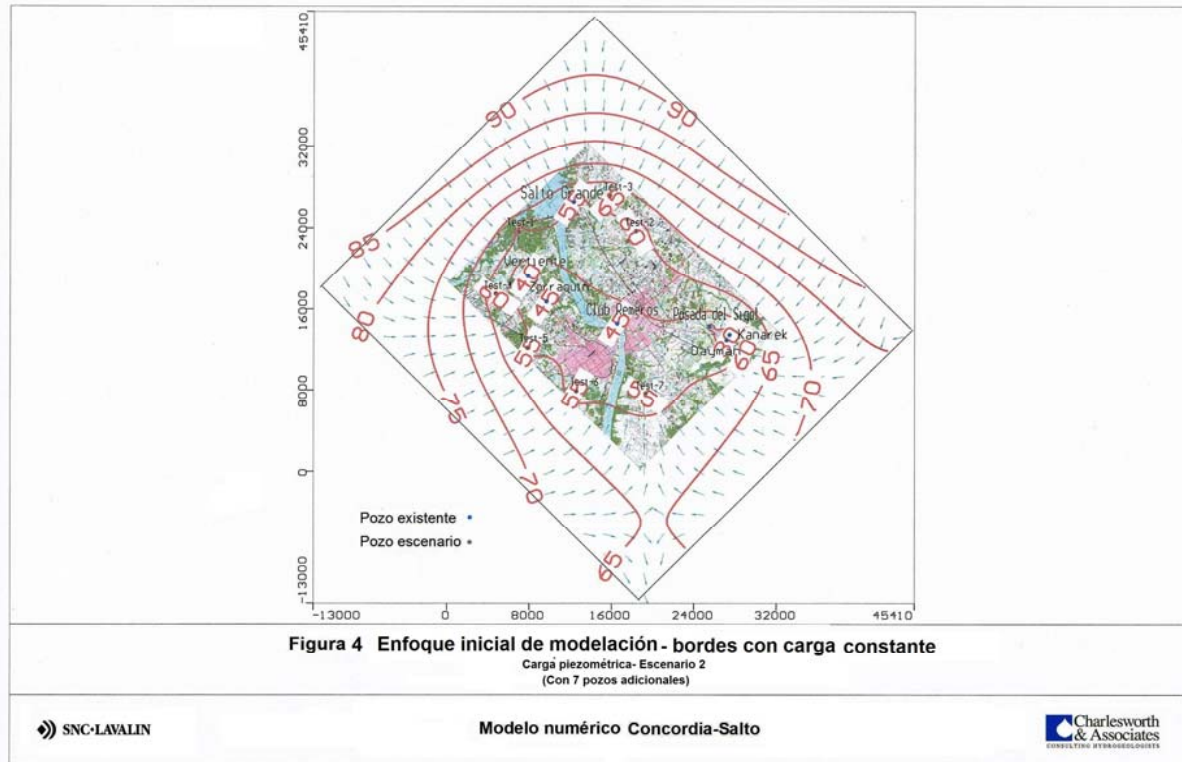
A continuación se describen brevemente los resultados de los dos primeros enfoques, así como las razones por las cuales se seleccionó el tercer enfoque como el más apropiado. El resto de la descripción del modelo numérico corresponde al tercer enfoque que es el cual se utilizó para el área piloto Concordia-Salto.

1. Modelo Inicial de Bordes con Carga constante

El área piloto Concordia-Salto tiene 19 km de ancho, extendiéndose desde la longitud E 398664 a la E 417808, y 26 km de largo desde la latitud N 6516153 a la N 6542343. De este modo se seleccionó el dominio del modelo inicial midiendo un área de 37 por 44 km y extendiéndose desde las coordenadas E 389791 N 6507123 en la esquina suroeste, hasta las coordenadas E 427065 N 6551094 en la esquina noreste. Como se describe luego en la sección 3.2.5, la malla para el modelo fue rotada 45 grados para reflejar la dirección de flujo del agua subterránea.

Este primer modelo fue simulado usando cargas constantes o controladas en los cuatro bordes del dominio del modelo. Las cargas a lo largo de los bordes se asignaron basándose en la interpretación de la superficie potenciométrica en la Figura 3. El modelo fue calibrado y validado satisfactoriamente.

Este modelo fue usado subsecuentemente para analizar escenarios con 2 y 7 pozos adicionales dentro del área piloto. La Figura 4 muestra las curvas piezométricas calculadas luego de agregar 7 pozos a los existentes en el área piloto, usando el enfoque de bordes con carga controlada. Luego de evaluar los resultados de escenarios se observó que los cuatro bordes con cargas fijas afectaban la extensión potencial de los conos de depresión. Por lo tanto, se consideró que el modelo restringía mucho las condiciones y se eligió otro enfoque que fuera menos restrictivo.

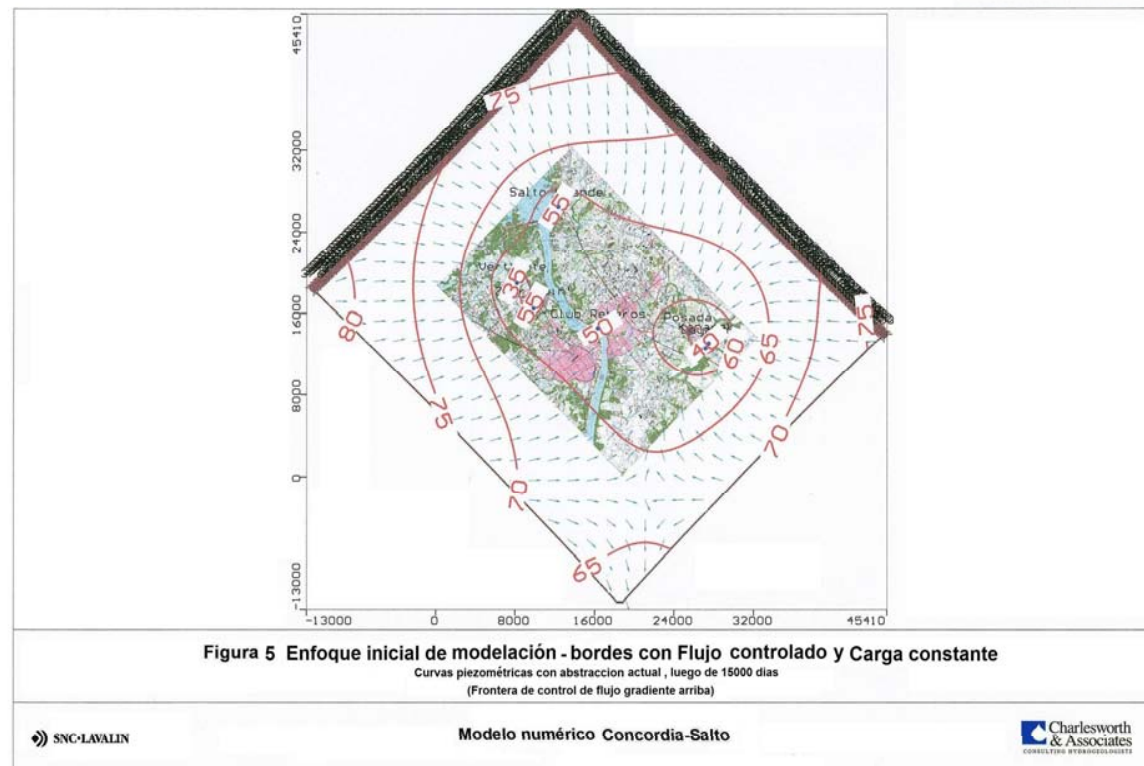




2. Condiciones de Borde Mixto (Carga controlada constante y Flujo controlado)

Luego de un taller realizado en Belo Horizonte en Noviembre de 2007, se recibió retroalimentación que indicaba que algunos participantes familiares con modelación de aguas subterráneas, opinaban que para este modelo los bordes de flujo controlado serían más apropiados, al menos a lo largo de los límites de gradiente ascendentes. Con base en esto también se corrió el modelo con bordes de flujo controlado en los dos lados de gradientes ascendentes del modelo. Los lados de gradientes descendientes se dejaron como límites de carga controlada, ya que se consideró más apropiado. Los límites de flujo controlado se establecieron como valores calculados aplicando la Ley de Darcy al modelo conceptual para el área y los resultados se compararon con los resultados cuando todos los límites eran de carga controlada (constante).

Este modelo también fue satisfactorio y los resultados de la corrida de calibración fueron comparables a los alcanzados con el modelo de bordes de carga controlada. Sin embargo, la superficie potenciométrica y los patrones de agua subterránea indicaron que la mayoría del flujo hacia los pozos de extracción ocurría hacia adentro a través de los bordes que inicialmente eran de gradiente inferior como lo muestra la Figura 5. Dado que el flujo de gradiente ascendente a través de los bordes era fijo, esto no es sorprendente, sin embargo se cree que es menos representativo de las actuales condiciones del campo de pozos.





3. Condiciones de Borde Mixto (Carga controlada constante y No Flujo)

Debido a las limitaciones de los enfoques de los modelos arriba descriptos, se desarrolló otro nuevo modelo con menos restricciones, incluyendo indicaciones del revisor del modelo. El dominio del modelo fue seleccionado para permitir que la malla del modelo siga los patrones de flujo noreste-sudoeste del agua subterránea que muestra la (Figura 3) y facilitar la selección de las condiciones de borde mixto. El dominio del modelo se presenta en la (Figura 6). Por lo tanto se seleccionó un dominio para el modelo extendiendo desde las coordenadas E 366856 N 6529187 y E408145 N 6488032 en las esquinas Suroeste y Sureste hasta E 408145 N 6570549 y E449420 N 6529187 en las esquinas Noroeste y Noreste. Este dominio del modelo es aproximadamente 45 km por 45 km y es mas grande que el dominio de los modelos descriptos en los enfoques anteriores.

En este modelo, los bordes superiores (sección hacia el norte) y los inferiores (sección hacia el sur) del dominio del modelo se muestran en la Figura 6, son bordes de carga constante. Como era el caso del modelo inicial, las cargas de los bordes fueron asignadas basados en la interpretación de la superficie potenciométrica (Figura 3). Los bordes a lo largo de los dos lados del dominio del modelo son relativamente perpendiculares a las curvas equipotenciales, por lo tanto esos dos lados del dominio del modelo pueden ser definidos como bordes de no flujo.

Este tercer enfoque fue seleccionado como el mas apropiado para el área piloto Concordia-Salto, ya que evita las restricciones del los cuatro bordes con cargas constantes, provee un dominio de modelo mas grande, y brindó una respuesta mas conservadora para representar los ensayos de bombeo. Este enfoque también fue aceptado por el revisor del modelo. La discusión que continúa en este informe presenta este último enfoque de modelación y los resultados de este modelo.



3.1.3 Bordes Verticales del modelo

Además de los límites laterales, fue necesario definir los límites superiores e inferiores del modelo. Como generalmente es el caso, se seleccionó la superficie del terreno como el límite superior del modelo y, para el límite inferior, el techo del basamento Precámbrico pareció ser el límite más apropiado. Esto marca el límite inferior de la sucesión sedimentaria y el límite superior de las rocas cristalinas subyacentes, que se suponen son relativamente impermeables comparadas con el Acuífero Guaraní. También se le considera como límite inferior del movimiento activo de agua subterránea.

3.2 Modelo en régimen permanente

3.2.1 Cuadrícula del modelo

Como se mencionó anteriormente, el enfoque de diferencias finitas usado en MODFLOW incluye la definición del área a ser modelada como una serie de celdas alineadas en filas y columnas y el arreglo de celdas constituye la cuadrícula del modelo. Los nodos creados por esa cuadrícula bi-dimensional pueden ser cuadrados o rectangulares.

La selección del espaciamiento nodal es importante pero una ventaja con el Visual MODFLOW es que el espaciamiento nodal puede ajustarse durante el proceso de modelación, añadiendo filas y columnas adicionales según sea necesario. Sin embargo, como la modelación puede requerir recursos significativos de computación, el diseño de la cuadrícula debe hacerse cuidadosamente, limitando el área de mayor resolución espacial al área de interés específico.

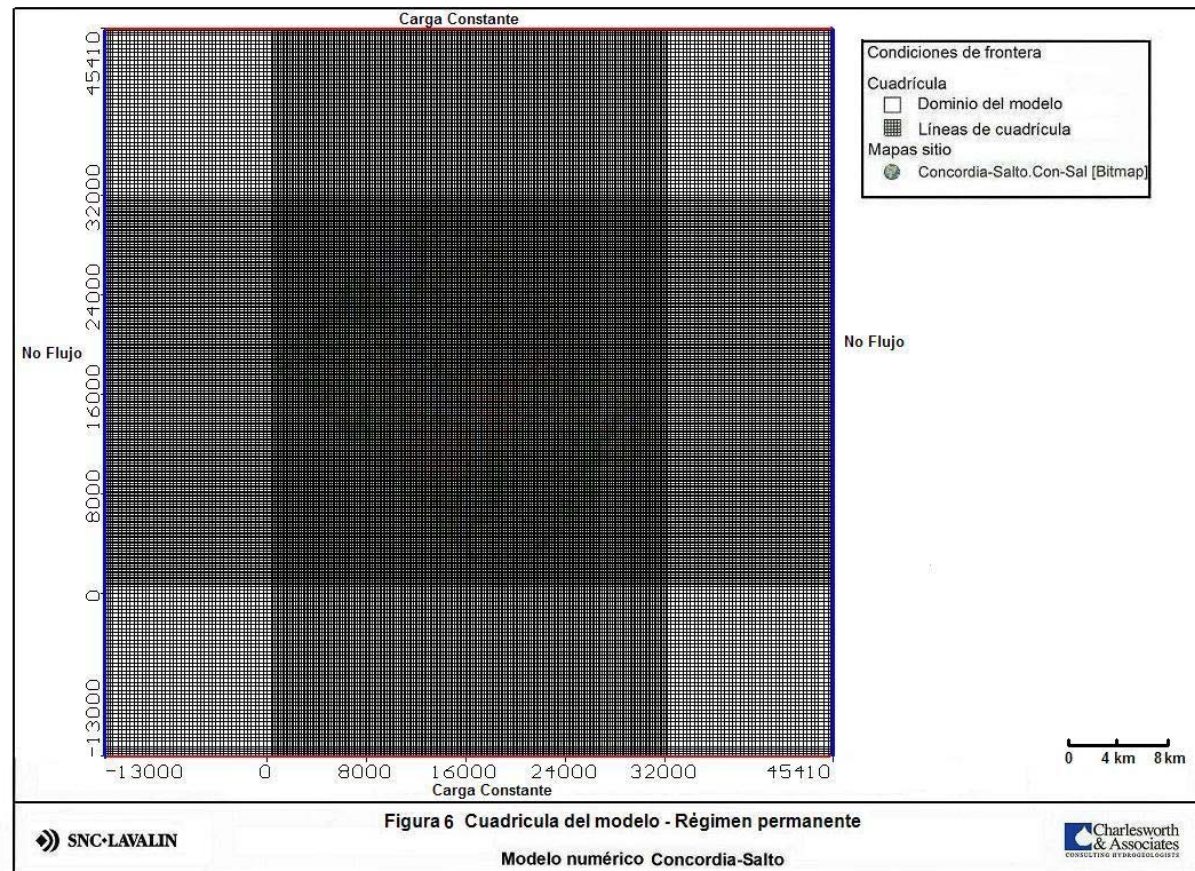
La cuadrícula inicial usada en el modelo fue de 296 filas por 297 columnas, con un espaciamiento uniforme de cuadrícula de 150m dentro del área piloto, dando como resultado 87.912 celdas activas. Sin embargo, para representar mejor la dirección del flujo del agua subterránea, se giró la cuadrícula a 45 grados hacia el rectángulo del área piloto (Figura 6). Subsecuentemente, durante la calibración del modelo transitorio, en las cercanías de los pozos de extracción el espaciamiento de 150 m de la cuadrícula se redujo, dando como resultado un mayor número de celdas.



3.2.2 Capas del modelo

Con la subsiguiente adición de capas en el sentido vertical, los nodos bidimensionales definidos por cuadrícula se convirtieron en cubos o bloques tridimensionales. La cuadrícula horizontal debe ser igual para cada capa. La selección de las capas del modelo usualmente corresponde a las unidades hidroestratigráficas, aunque aún en casos simples se ha mostrado que al subdividir una unidad simple del acuífero en varias capas idénticas se puede obtener una estimulación mejorada del movimiento vertical y facilitar la convergencia del modelo.

Se usó la información estratigráfica de ocho pozos ubicados dentro del área piloto, junto con algunos mapas geológicos y secciones transversales, para desarrollar un modelo preliminar conceptual que a su vez se usó para preparar el modelo de flujo preliminar. Inicialmente esto se hizo independientemente del desarrollo del modelo conceptual regional para permitir que comenzaran los trabajos en la modelación informática. Una vez terminado el modelo conceptual completo, las superficies de ese modelo se importaron al modelo informático y luego se llevó a cabo la calibración final.





Los depósitos en superficie en Concordia-Salto, que en algunos sitios constituyen un acuífero, no son parte del presente estudio y no se incluyen como capas separadas en el modelo. Esto fue considerado como un enfoque razonable dado que parecían tener poca o ninguna participación en la incidencia y movimiento del agua subterránea del Acuífero Guaraní en el área piloto Concordia-Salto. Además, están separados del Acuífero Guaraní por cientos de metros de basalto de baja permeabilidad, de los cuales una porción significativa constituye un acuicludo.

La primera unidad significativa, en términos de modelación, es el basalto grueso de la Formación Serra Geral que pertenece a la era Cretácea y constituye una capa confinante de muy baja permeabilidad para el Acuífero Guaraní subyacente. Esto se confirma en el área piloto Concordia-Salto por las altas cargas artesianas que presenta el acuífero subyacente, que están a decenas de metros sobre el nivel del terreno.

Para las corridas de calibración de régimen permanente, se crearon inicialmente tres capas, la Capa 1 que representa el basalto y los depósitos recientes, la Capa 2 para el Acuífero Guaraní principal y la Capa 3 que representa los depósitos Pérmicos. Subsecuentemente, sin embargo, la unidad principal del acuífero (Capa 2) se dividió en seis capas para permitir la simulación de tres sub-unidades del acuífero, a las que se les asignó valores diferentes de conductividad hidráulica. Los depósitos Pérmicos subyacentes, inicialmente representados como la Capa 3, se dividieron en dos capas cada una con la conductividad hidráulica de la Capa 3 original.

La configuración revisada de la capa se presenta en la Tabla 4. La Figura 7 muestra el tope de cada unidad hidroestratigráfica, que es la información a ingresar al modelo, pero no las capas individuales que conforman las unidades.

El basalto se estableció como una capa inactiva, lo que se consideró como un enfoque razonable ya que una parte significativa de la unidad es, para todos los fines y propósitos, un acuicludo. Las cargas piezométricas altas en el Acuífero Guaraní (es decir, sobre el nivel del terreno) indican gradientes hidráulicos fuertes hacia arriba sin posibilidad de recarga directa al acuífero desde la superficie del terreno. En algunas pruebas del modelo de régimen permanente la capa de basalto se activaba pero con una muy baja conductividad hidráulica y esto no tuvo efecto en los niveles de agua simulados en el acuífero.



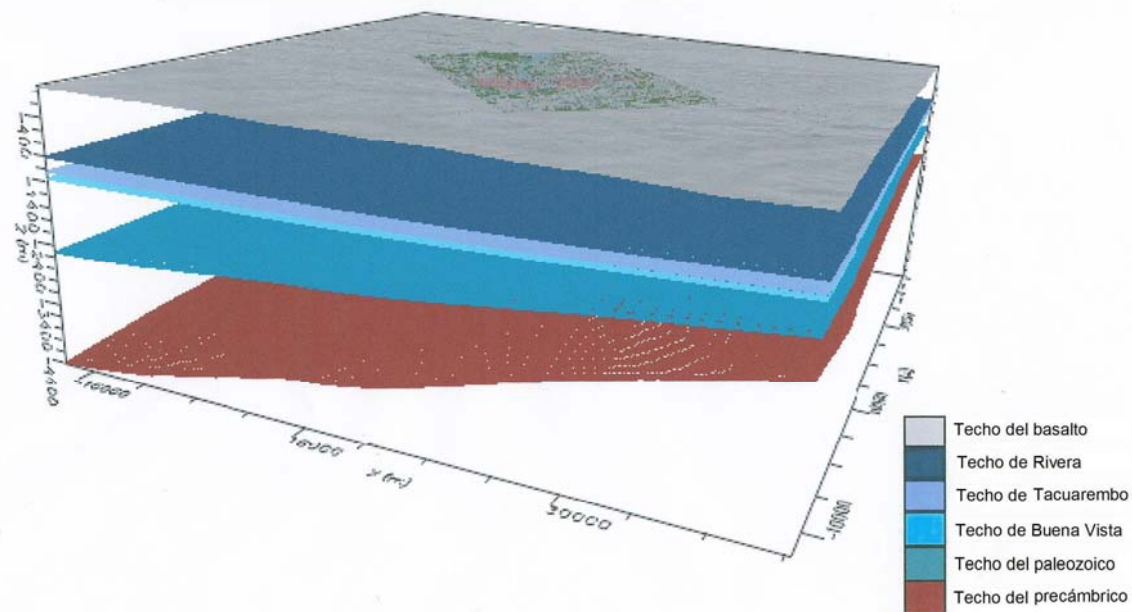
Tabla 4: Capas del Modelo

Interpretación usada en el modelo numérico	Edad	Capas del Modelo	Conductividad Hidráulica modelo Inicial (m/d)	Conductividad Hidráulica modelo calibrado (m/d)
Basalto	Cretácico	1	Inactiva	Inactiva
Formación Rivera	Jurásico	2 ----- 3	$K_H = 0.6$ $K_V = 0.06$	$K_H = 1.2$ $K_V = 0.12$
Formación Tacuarembó		4	$K_H = 0.3$ $K_V = 0.03$	$K_H = 0.6$ $K_V = 0.06$
Formación Buena Vista	Triásico	5 ----- 6	$K_H = 0.1$ $K_V = 0.01$	$K_H = 0.1$ $K_V = 0.01$
	Pérmico	----- 7		
		8 ----- 9		
Yaguarí (sedimentos costeros) Grupo Melo (marino superficial) San Gregorio (glaciar)	Posiblemente sedimentos Paleozoicos mas viejos debajo del Pérmico		$K_H = 0.01$ $K_V = 0.001$	$K_H = 0.01$ $K_V = 0.001$
Basamento	Precámbrico		$K = 0$	$K = 0$

No esta a escala. El área sombreada se consideró como SAG con la Formación Rivera como la unidad contenedora de agua más importante.



Figura 7 Unidades hidrogeológicas en el modelo





3.2.3 Conductividad hidráulica

Inicialmente en el modelo de régimen permanente de Concordia-Salto, se estableció la conductividad hidráulica horizontal de la Formación Rivera (Capas 2 y 3 en el modelo) en 0,6 m/día, basándose en información publicada y ensayos de descarga del acuífero en el noroeste de Uruguay, como se mencionó en la sección 2.4. Para la Formación Tacuarembó (Capa 4 en el modelo), que es conocida por ser menos permeable que la Formación Rivera, la conductividad hidráulica se estableció en 0,3 m/día y para la FM Buena Vista (Capas 5, 6 y 7 en el modelo) la conductividad hidráulica se estableció en 0,1 m/día.

Durante el proceso de calibración, la conductividad hidráulica de las formaciones principales fue ajustada a los valores calibrados de 1,2 m/día para la Formación Rivera y 0,6 m/día para la Formación Tacuarembó. Estos valores de conductividad hidráulica están en relación con los valores usados para otras áreas piloto.

A los sedimentos Paleozoicos del acuitardo (Capas 8 y 9 en el modelo) se les asignó una conductividad hidráulica de 0,01 m/d. En todas las capas la conductividad hidráulica vertical fue asumida como 10% de la conductividad horizontal, es decir $KV = 0,1KH$.

3.2.4 Niveles del agua y cargas hidráulicas

Hubo limitaciones en la disponibilidad de información sobre los niveles de agua en los ocho pozos que penetran el Acuífero Guaraní dentro del área piloto y estos, junto con los niveles de agua de los pozos fuera del dominio del modelo, fueron perfilados inicialmente utilizando el programa SURFER y subsecuentemente ajustados manualmente para construir un mapa de niveles piezométricos del acuífero dentro del dominio del modelo. La información de cargas hidráulicas se extrajo de ese mapa, con el fin de definir las cargas a lo largo de los límites del modelo. Por lo tanto, los perfiles piezométricos para el dominio del modelo se extrajeron del mapa de niveles piezométricos sub-regional y se utilizaron para el modelo de régimen permanente, como se presenta en la Figura 3.

3.2.5 Condiciones de bordes

Como se describió anteriormente, los bordes laterales hacia el norte y hacia el sur del modelo se definieron inicialmente como límites de carga constante y se les asignaron valores



apropiados, basados en el mapa de niveles piezométricos mencionado arriba, que indica que la dirección de flujo es de noreste a suroeste en el área piloto. Las cargas limitantes variaron entre 100 msnm en el borde norte del dominio del modelo hasta aproximadamente 65 msnm en el borde sur.

Como los bordes laterales este y oeste del dominio del modelo son relativamente perpendiculares a la dirección de flujo (ej: equipotencial), se asumió que no habría flujo significativo de agua a través de los bordes este y oeste, por lo tanto estos bordes se definieron como de No flujo. Las condiciones de borde se muestran en la Figura 6.

3.2.6 Recarga y ríos

Dado el espesor del basalto de muy baja permeabilidad, y los grandes gradientes hidráulicos ascendentes en el área, teóricamente dentro del área piloto no hay posibilidad de recarga del acuífero de areniscas (SAG), lo que simplifica de alguna forma el ejercicio de modelación. También puede haber una descarga insignificante de agua subterránea desde el acuífero en la superficie del terreno, excepto a través de las perforaciones.

3.3 Modelo en régimen transitorio

Para el modelo en régimen transitorio fue necesario añadir tasas de extracción para los pozos existentes. De la información disponible de las tasas de extracción, los valores presentados en la Tabla 5 fueron ingresados al modelo.



Tabla 5: Tasas de extracción de pozos de producción

Número de la perforación	Nombre de la perforación	Tasa de extracción m ³ /día
7203	Vertiente	4800
7324	Dayman	3360
7335	Salto Grande	3200
7336	Kanarek	1920
7348	Posada del Siglo XIX	1440
7349	Club Remeros	960
8149	Zorraquin	2400
7325	OSE	0



4.0 CALIBRACION DEL MODELO

4.1 Modelación de régimen permanente

El modelo del régimen permanente se corrió durante 15000 días sin haber pozos en funcionamiento. La calibración del modelo se logró mediante un procedimiento de prueba y error comparando cargas hidráulicas simuladas con cargas observadas en las perforaciones y en otros puntos en el modelo.

Se realizaron numerosas corridas con diferentes valores de conductividad hidráulica. Los niveles de agua calculados para las perforaciones fueron comparados con los niveles de agua medidos en las perforaciones y utilizados como base de datos para calibración de todo el dominio del modelo. Se obtuvo un error aceptable de calibración de 10,5 de raíz media cuadrática (RMS) normalizada, lo que está cerca del “estándar industrial” de menos del 10% como muestra la Figura 8. En este modelo, el máximo residual (es decir, la diferencia entre el nivel de agua observado y el calculado) fue de 1,91 m y el mínimo residual fue 0,28 m. El promedio residual es -0,39m, relativamente cercano a cero, indicando que el modelo calibrado no tiene error sistemático de sobreestimación o desestimación de niveles de agua.

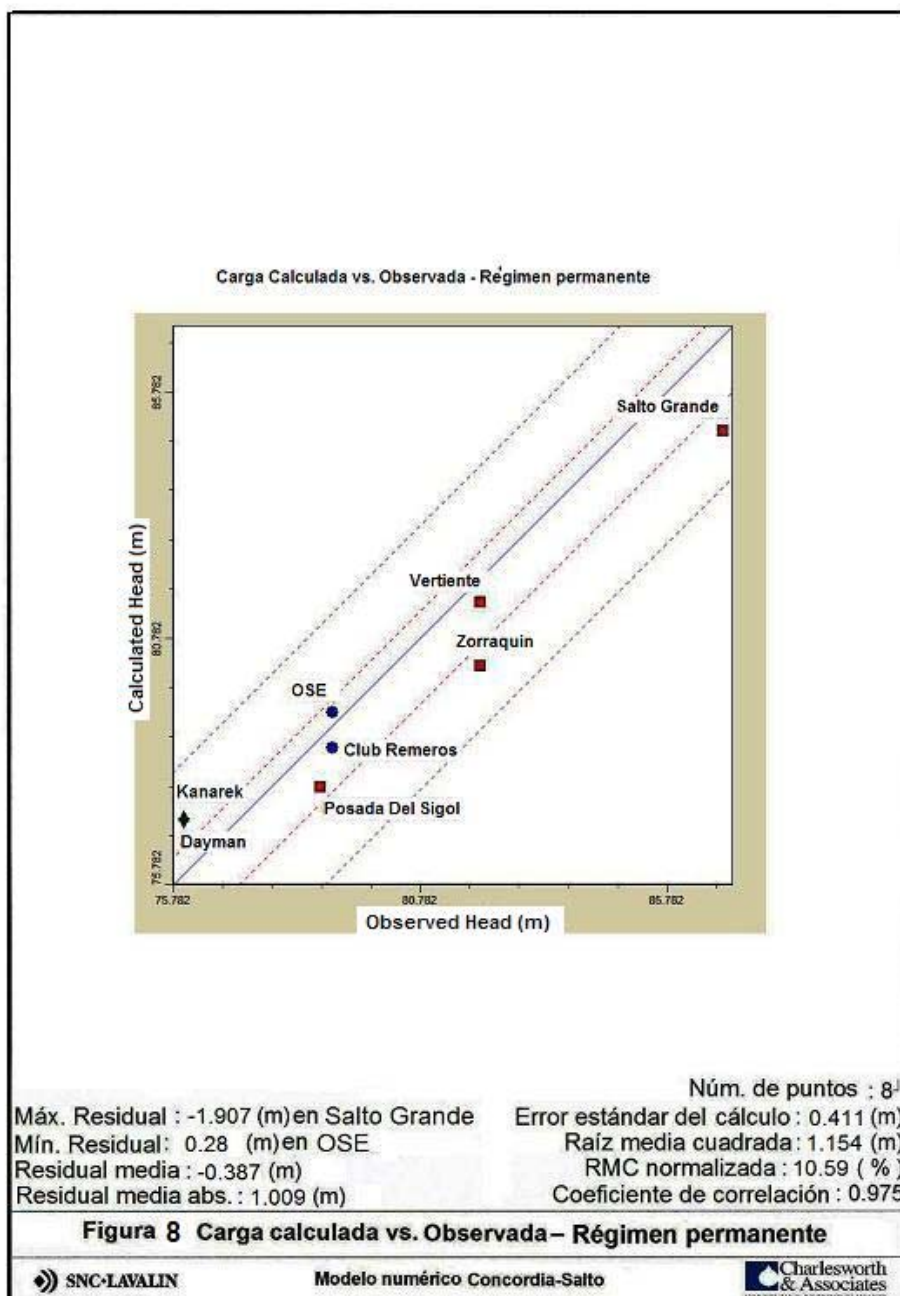
En general, las cargas piezométricas calculadas por el modelo de régimen permanente al final de los 15000 días fueron similares a las cargas piezométricas que se presentan en la Figura 9 y se consideró que constituían una representación razonable de los niveles de agua en el área piloto cuando no había pozos en funcionamiento. Casi en toda el área la diferencia entre las cargas de entrada y las cargas calculadas fue menor a 0,5 m y en otras partes, a excepción de algunos puntos a lo largo de los bordes, la diferencia máxima fue de aproximadamente 2 m.

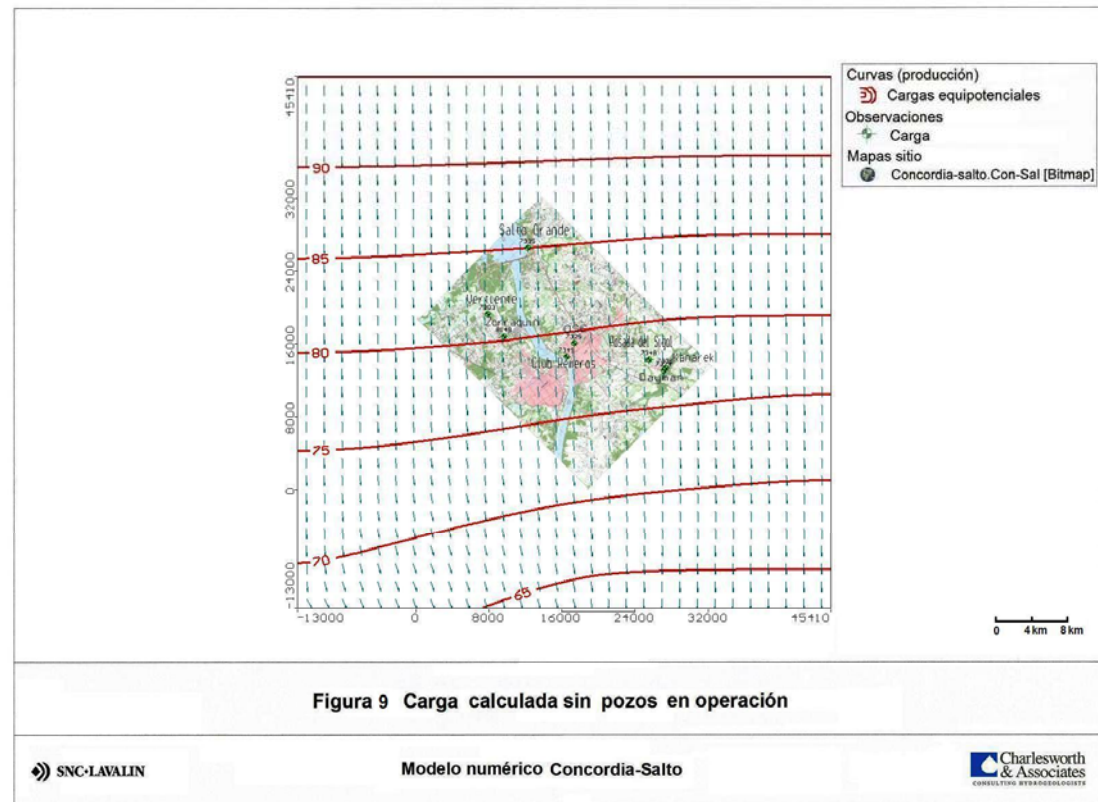
Si hubiera existido un historial de datos acerca del nivel de agua para las distintas perforaciones, el modelo se podría haber calibrado contra esos datos. Sin embargo, ante la ausencia de dichos datos se decidió proceder con el régimen permanente y validar el modelo comparándolo con los datos disponibles del ensayo hidráulico. Por lo tanto, en dicho momento se podrá realizar otra calibración, si fuera necesario.

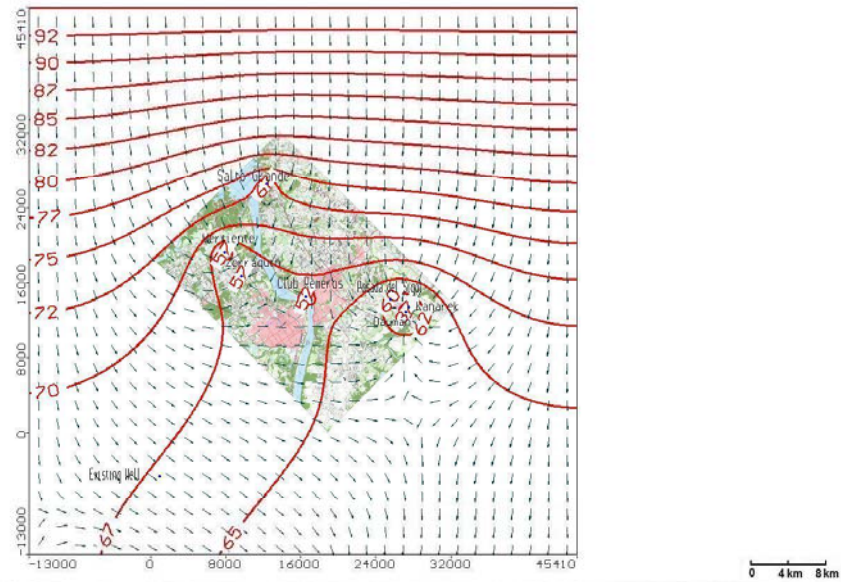
En la Figura 9 se presenta el mapa de niveles piezométricos derivado de las cargas calculadas para el modelo de régimen permanente. Las cargas calculadas se utilizaron como datos iniciales de entrada para el modelo transitorio.



Una vez completada la calibración sin pozos bombeando, los 8 pozos activos existentes se prendieron para simular las condiciones de agua subterránea existente. La Figura 10 muestra las curvas piezométricas calculadas para el modelo cuando todos los pozos están descargando y pueden ser comparados con la Figura 9 que representa los niveles estáticos de agua en el área piloto.







**Figura 10 Curvas piezométricas con abstracción actual, luego de 15000 días
(Frontera de control de carga)**



4.2 Modelado en régimen transitorio

4.2.1 Validación del modelo

Una vez calibrado el modelo en régimen permanente, se utilizó una versión transitoria para duplicar los resultados de los ensayos hidráulicos en los pozos para los cuales había datos disponibles. En esto consistió la parte de validación del proceso de modelación. Las cargas piezométricas derivadas del modelo régimen permanente se utilizaron como datos de entrada para el modelo en régimen.

Se habían realizado ensayos hidráulicos en varios de los pozos y por lo tanto se contaba con tasas de extracción y abatimientos de nivel relacionados. Además, en algunos de los pozos se había determinado la transmisividad a partir de los ensayos hidráulicos, siendo posible, de esta manera, calcular la conductividad hidráulica para el acuífero en las cercanías a esas perforaciones. Para las perforaciones de Daymán, Kanarek, Club Remeros, OSE, Vertiente y Villa Zorraquín había datos disponibles de los ensayos hidráulicos.

Cuando se introdujeron en el modelo los detalles de los pozos de extracción, el espaciamiento dentro de la cuadrícula en las inmediaciones de los pozos de extracción se redujo a 150 m para tener un mejor control en la calibración con los resultados de los ensayos hidráulicos. Esto incrementó a 246.015 la cantidad total de celdas activas.

Luego se probó el modelo para condiciones transitorias: inicialmente alternando los pozos de manera separada y luego se probó el modelo durante el tiempo de duración de cada ensayo hidráulico. Esto se repitió en cada pozo y, en cada caso, se hicieron varias pruebas con cambios en los campos de conductividad hidráulica local con el fin de obtener una combinación aceptable. Esta calibración adicional del modelo es una parte inevitable del proceso.

Se incluyó en el modelo un valor de coeficiente de almacenamiento de $5E-7$ para las unidades del SAG y $9E-9$ para el Pérmico. Durante la validación se realizaron algunos ajustes en la vecindad de los pozos para los cuales existían datos de ensayos de bombeo, lo que arrojó valores validados en el rango de $1,4 E-6$ a $8E-8$ en áreas locales alrededor de los pozos ensayados.

El éxito del proceso de validación se evaluó comparando las disminuciones observadas y calculadas en los abatimientos de los ensayos hidráulicos. Las Tablas 6 a 9 presentan las comparaciones de los resultados simulados frente a los observados para los ensayos hidráulicos en los pozos.



Tabla 6: Resultados de simulación frente a resultados observados para el ensayo hidráulico de bombeo en la perforación Daymán

Pozo	Estado	Abatimiento observado (m)	Abatimiento simulado (m)	Conductividad hidráulica utilizada en el modelo (m/día)
Daymán	En operación	41,8	40,9	0,148
Kanarek	Observación	3,7	3,64	0,45

Tabla 7: Resultados de simulación frente a resultados observados para el ensayo hidráulico de bombeo en la perforación Kanarek

Pozo	Estado	Abatimiento observado (m)	Abatimiento simulado (m)	Conductividad hidráulica utilizada en el modelo(m/día)
Kanarek	En operación	32,8	28,6	0,45
Daymán	Observación	3,3	2,3	0,148

Tabla 8: Resultados de simulación frente a resultados observados para el ensayo hidráulico de bombeo en la perforación Club-Remeros

Pozo	Estado	Abatimiento observado (m)	Abatimiento simulado (m)	Conductividad hidráulica utilizada en el modelo (m/día)
Club Remeros	En operación	31,1	31,3	0,3
OSE	Observación	1,5	1,6	0,3

Tabla 9: Resultados de simulación frente a resultados observados para el ensayo de descarga en la perforación Villa Zorraquín

Pozo	Estado	Descenso de nivel observado (m)	Descenso de nivel simulado (m)	Conductividad hidráulica utilizada en el modelo (m/día)
Villa Zorraquín	En operación	17,1	15	1,7
Vertiente	Observación	-	-	-



En el ensayo hidráulico de bombeo en Villa Zorraquín, la interferencia entre el pozo de descarga y el pozo de observación no resultó obvia, ya que las grandes oscilaciones en los niveles de agua tanto en el pozo de descarga como en el de observación tienden a ocultar los efectos de interferencia entre los pozos.

Una vez ajustadas las conductividades hidráulicas en ciertas áreas, según se observó anteriormente, se realizó la prueba del modelo durante 15000 días asumiendo que todos los pozos estaban siendo bombeados y se examinaron todos los resultados. En este punto se observó que el nivel dinámico calculado en la perforación Daymán se encontraba por debajo del nivel del terreno al término de los 15000 días, una situación en la que, en la realidad, la perforación habría dejado de fluir. Además, al realizarse simulaciones de menor duración, por ejemplo de 700 días, el nivel de agua en la perforación Daymán aún descendía por debajo del nivel del terreno. Esto indicaba que existían problemas con el valor bajo de conductividad hidráulica que se había introducido en el modelo en las inmediaciones de la perforación Daymán, a pesar de que ese era el valor requerido para duplicar los datos del ensayo de descarga.

Luego de efectuar varias pruebas se concluyó que el problema se hallaba probablemente en los datos de ensayo del acuífero, dado que los resultados de la perforación cercana, Kanarek sugerían un valor hidráulico más parecido al valor regional asumido. Cuando el valor bajo alrededor de la perforación Daymán (0,14 m/d) se reemplazó por el valor que se había aplicado alrededor de la perforación Kanarek (0,45 m/d) se obtuvo un resultado más satisfactorio cuando el modelo se probó por 15000 días, sin que la carga piezométrica cayera por debajo del nivel del terreno en la perforación Daymán.

En este estudio, en el que existe incertidumbre alrededor de muchos de los datos de entrada, un hecho sabido es que según las condiciones existentes la perforación Daymán ha mantenido una carga de flujo artesiana y es importante que el modelo refleje este hecho.



5.0 MODELO PREDICTIVO

5.1 Objetivos

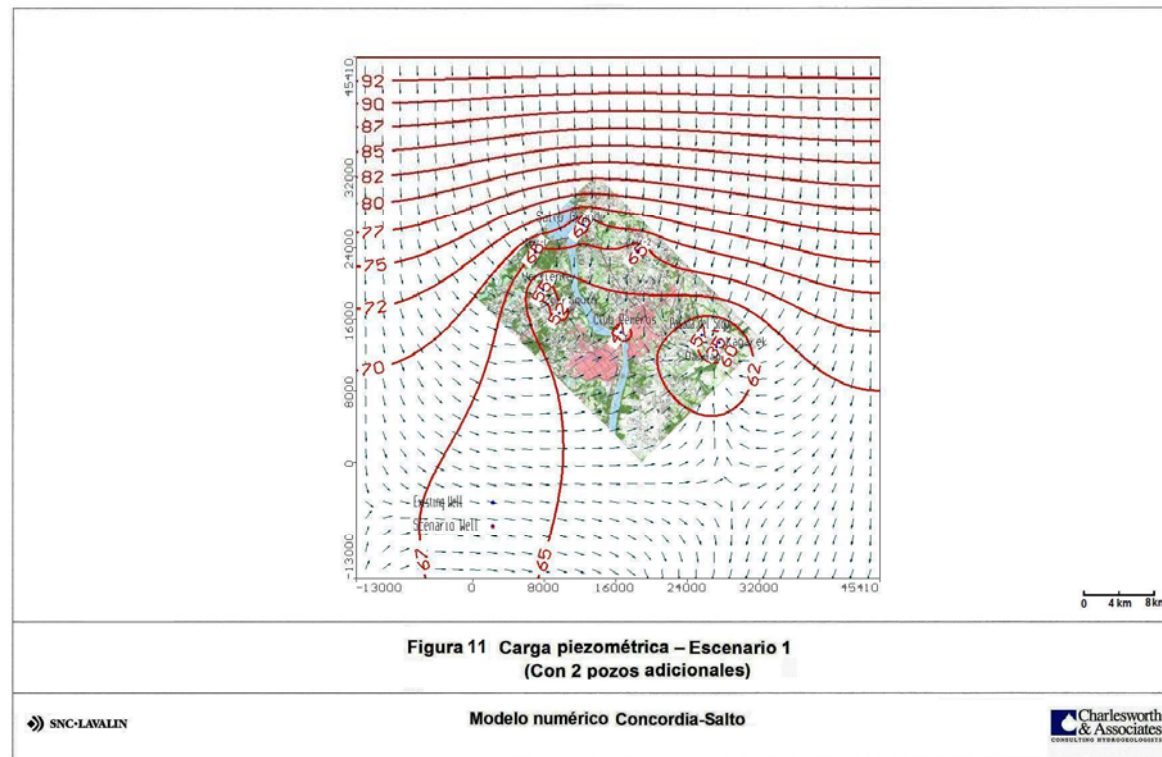
El principal objetivo del modelo informático del área piloto Concordia-Salto es ayudar en el planeamiento del desarrollo futuro de las aguas termales de las ciudades de Concordia y Salto y sus alrededores. Si se ha logrado una simulación razonable de la situación existente en el acuífero, en cuanto a la extracción actual, entonces debería ser posible simular impactos que pudieran ocurrir a partir de la construcción y activación de nuevas perforaciones. Con esta finalidad se simularon dos escenarios de desarrollo, el primero representando la adición de dos nuevas perforaciones y el segundo representando un total de siete nuevas perforaciones.

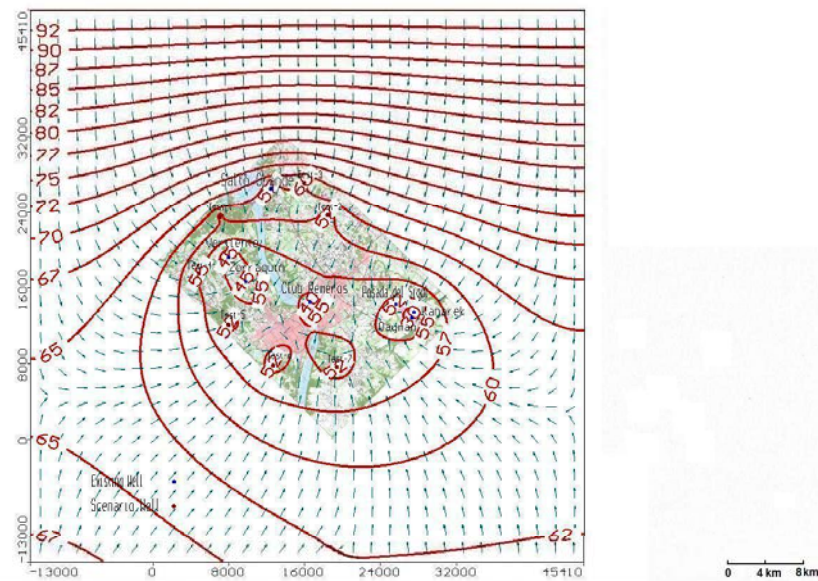
5.2 Escenario 1

Para este escenario se agregaron dos perforaciones adicionales, una en Ayui en el lado argentino de la frontera y la otra en Salto aproximadamente a 3.000 m de la perforación de OSE, cada una con una tasa de extracción de 2400 m³/d (con base en una tasa de 150 m³/h durante 16 horas al día). Se probó el modelo estando todos los pozos (existentes y proyectados) en funcionamiento durante 15000 días. Las cargas piezométricas resultantes se presentan en la Figura 11. Se puede ver que aunque existe un descenso de la superficie piezométrica dentro del área piloto, según se manifiesta por un movimiento hacia el norte del nivel de 67 m, en general el impacto no parece ser excesivo. Lo que no resulta evidente en la Figura 11 son los impactos calculados en los niveles de agua en las perforaciones existentes, esto se aborda en la sección 5.4.

5.3 Escenario 2

El escenario 2 requirió la adición de cinco perforaciones más, para alcanzar un total de siete perforaciones proyectadas, localizándose cuatro de ellas en el lado argentino de la frontera internacional y tres en el lado uruguayo. Se utilizaron las mismas tasas de extracción que en el escenario 1, las cuales son las máximas permitidas según la legislación actual. Las perforaciones virtuales se colocaron a una distancia mínima de 3.000 m de las perforaciones existentes más cercanas. La Figura 12 presenta los niveles piezométricos calculados luego de 15000 días. Se puede ver que el impacto, como se esperaba, es significativamente mayor que el impacto en el escenario 1. Una vez más, esto no muestra todo el impacto sobre los niveles de agua existentes, lo que se abordará más adelante en este informe.





**Figura 12 Carga piezométrica – Escenario 2
(Con 7 pozos adicionales)**



5.4 Impactos en perforaciones existentes

Según se mencionó anteriormente, debido a la escala del mapa, los niveles reales de agua en las perforaciones al final de la operación del modelo no son visibles; sin embargo éstos se pueden extraer del modelo y se muestran en la Figura 16. Esto muestra la carga calculada bajo las condiciones presentes (es decir, todos los pozos operando simultáneamente a las tasas existentes) y la compara con los niveles de agua calculados en los escenarios 1 y 2.

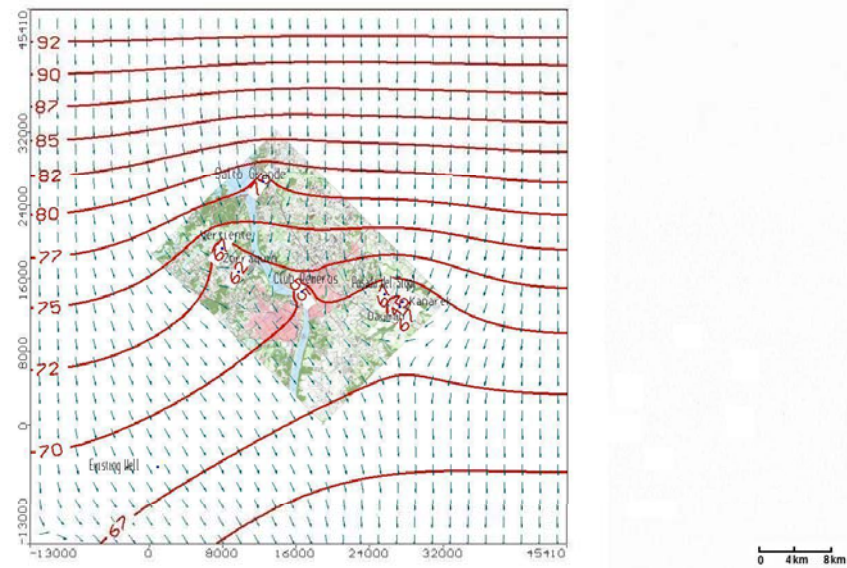
Cabe destacar que, en la vida real, a medida que los caudales piezométricos en las perforaciones disminuyen, las tasas de descarga también disminuyen; sin embargo el modelo no tiene esto en cuenta y las tasas de descarga se mantienen constantes a lo largo de la realización del modelo. Al mirar la Figura 16 se puede ver que el modelo predice disminuciones significativas en los niveles de agua de las perforaciones.

5.5 Análisis de Sensibilidad

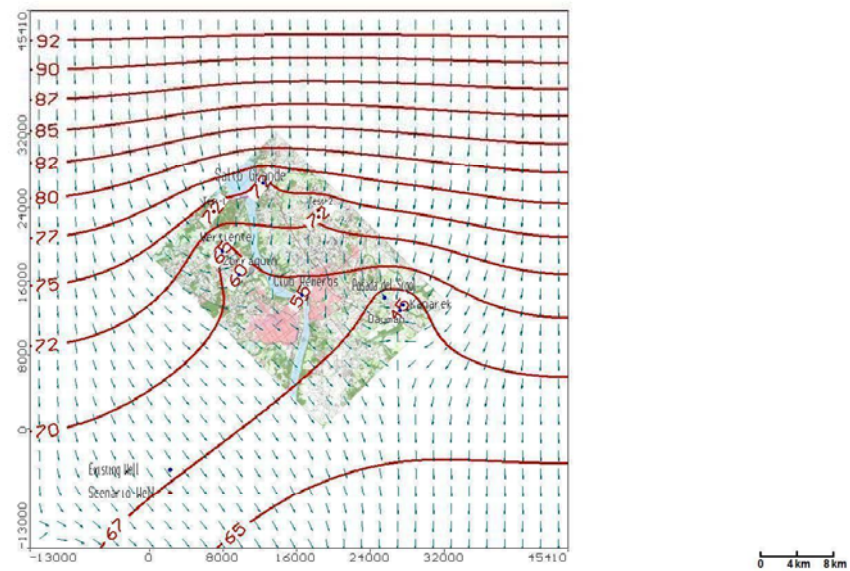
El análisis de sensibilidad es el proceso por el cual se modifican los parámetros de entrada del modelo a lo largo de un rango razonable y se observa el cambio en la respuesta del modelo. El propósito del análisis es demostrar la sensibilidad de las simulaciones del modelo ante la incertidumbre en los valores de los datos de entrada del modelo.

En el caso del modelo Concordia-Salto uno de los parámetros para el cual existe una incertidumbre considerable con respecto a los valores reales es la conductividad hidráulica regional. Por consiguiente, se eligió este parámetro para el análisis de sensibilidad, el cual consistió en volver a correr el modelo para las condiciones existentes y para los dos escenarios de desarrollo incrementando la conductividad hidráulica regional de 1,2 a 2,4 m/d, es decir, un incremento del 100%. Las cargas piezométricas resultantes se confrontaron luego con figuras comparables con la menor conductividad hidráulica regional.

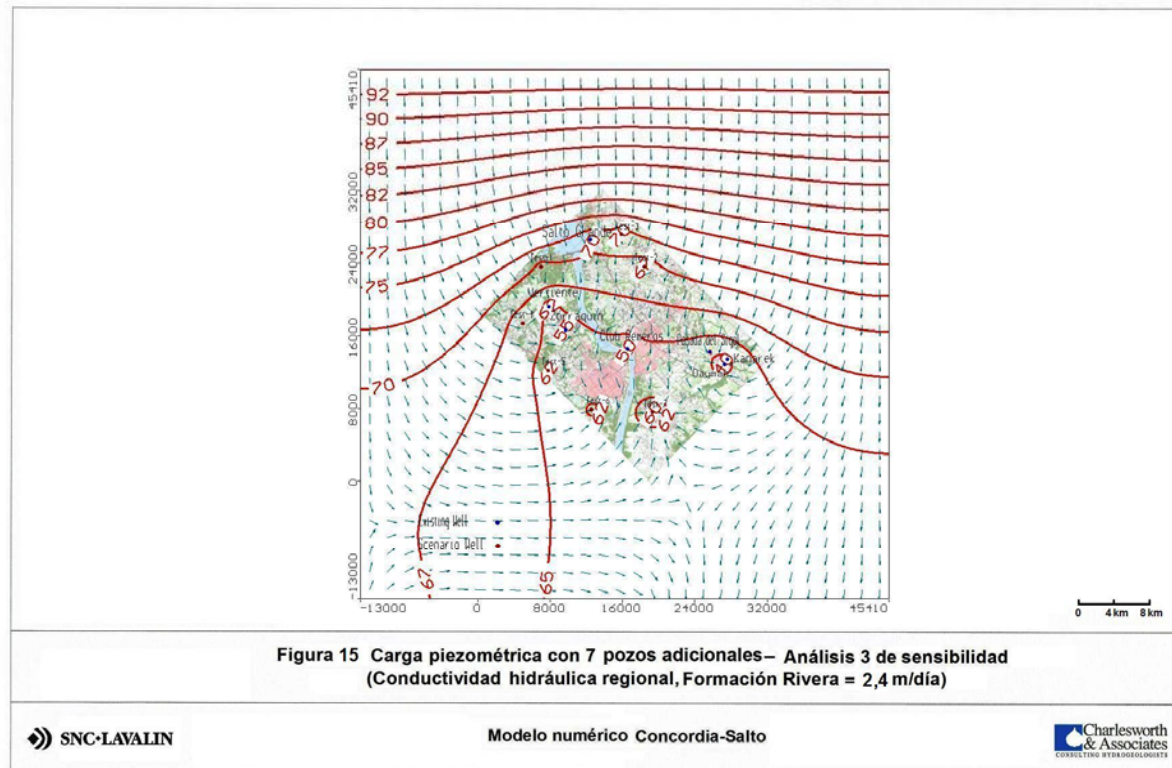
La Figura 13 presenta los niveles piezométricos calculados por el modelo cuando todos los pozos existentes se hallan descargando, con una conductividad hidráulica regional en la unidad principal del acuífero incrementada a 2,4 m/d. Esto se puede comparar con la Figura 10, donde la conductividad hidráulica regional es 1,2 m/d. Como se puede ver, aunque existen algunas diferencias en la configuración de los niveles, los cambios generales no son grandes. Las Figuras 14 y 15 son mapas similares para los dos escenarios de desarrollo y se pueden comparar con las Figuras 11 y 12.



**Figura 13 Carga piezométrica con abstracción actual – Análisis 1 de sensibilidad
(Conductividad hidráulica regional, Formación Rivera =2,4 m/día)**



**Figura 14 Carga piezométrica con 2 pozos adicionales– Análisis 2 de sensibilidad
(Conductividad hidráulica regional, Formación Rivera = 2,4 m/día)**





5.6 Evaluación del impacto

Para facilitar la evaluación de los efectos de la extracción actual y futura de aguas subterráneas se prepararon una serie de secciones transversales esquemáticas, basándose en los resultados del modelo numérico. Estas secciones esquemáticas proveen una representación visual de la disminución potencial de carga hidráulica (y por lo tanto el potencial de pérdida de las condiciones de flujo artesiano) en los pozos existentes cuando se adicionan y se bombean nuevos pozos.

Se preparó una sección transversal esquemática probando las siete perforaciones termaleas en funcionamiento dentro del área piloto, desde Salto Grande en el norte hasta Daymán en el sur. No es una línea recta, sino más bien una línea zigzagueante que va de perforación en perforación. En cada perforación las cargas piezométricas fueron calculadas para las condiciones actuales (es decir, estando todos los pozos en funcionamiento); para el escenario 1 (dos pozos adicionales); y para el escenario 2 (siete pozos adicionales). Las mismas se presentan en la Figura 16, junto con las cargas estáticas y la elevación del terreno. Los puntos de las cargas estáticas y la elevación del terreno se unieron con líneas, ya que esto muestra una apreciación aproximada de las condiciones a lo largo de la línea de la sección; sin embargo, en el caso de los distintos niveles dinámicos de agua no sería apropiado conectar los puntos debido a que estos representan los puntos más bajos a lo largo de la línea de la sección. La superficie piezométrica se elevará entre las perforaciones, más allá de los radios de los conos de influencia.

A partir de la Figura 16 se puede ver que, de acuerdo al modelo, la situación en Vertiente y Zorraquin es problemática (como lo indica la disminución de carga hidráulica en estos dos pozos) y podría tornarse crítica con siete pozos adicionales. Teniendo esto en consideración, surgen algunas preguntas sobre la confiabilidad de los datos de entrada para estas perforaciones, que en Vertiente, parecen mostrar un nivel muy alto de extracción en comparación con las otras perforaciones.

La Figura 17 se creó de la misma manera que la figura anterior pero utilizando datos del modelo probado donde la conductividad hidráulica regional en la unidad principal del acuífero se incrementó de 1,2 a 2,4 m/d. En este caso se puede observar que la situación es más razonable ya que todos los pozos mantienen los niveles de agua sobre el nivel del terreno. Esto muestra cuán sensible es el modelo a los valores de conductividad hidráulica del acuífero.



Según se observó anteriormente, las Figuras 16 y 17 muestran cargas dinámicas en los sitios de las perforaciones y no se pueden extrapolar entre perforaciones. La Figura 18 es una figura similar pero representa las cargas calculadas a partir del modelo a lo largo de una línea que corre más o menos desde el extremo noreste hasta el sudoeste del área piloto. La línea del corte se seleccionó de forma que evitara pasar directamente a través de los pozos de producción o muy próximo a ellos y de esta manera se muestra una apreciación de los impactos de bombeo calculados (existentes e hipotéticos) en la superficie piezométrica regional. La Figura 19 se construyó de igual forma que las anteriores pero usando datos del modelo corrido cuando la conductividad hidráulica regional en la unidad del acuífero principal se incrementó de 1,2 a 2,4 m/d. La Figura 20 muestra la línea de perfil.

La Tabla 10 presenta los balances hídricos al término de 40 años para los distintos escenarios con una conductividad hidráulica regional de 1,2 m/d, y la Tabla 11 presenta los mismos escenarios pero con una conductividad hidráulica regional aumentada a 2,4 m/d.

Tabla 10: Balance hídrico en el año 40
(Conductividad hidráulica regional, Formación Rivera = 1,2 m/día)

Escenario	ENTRADA (m ³ /d)		SALIDA (m ³ /d)		ENTRADA total (m ³ /d)	SALIDA total (m ³ /d)
	Carga Constante	Almacena- miento	Carga Constante	Pozos		
Pozos existentes	20.723	5	2.805	18.080	20.728	20.885
Pozos existentes + 2 pozos futuros	23.905	6	1.262	22.880	23.911	24.142
Pozos existentes + 7 pozos futuros	34.662	7	60	34.880	34.669	34.940



Tabla 11: Balance hídrico en el año 40
(Conductividad hidráulica regional, Formación Rivera = 2,4 m/día)

Escenario	ENTRADA (m ³ /d)		SALIDA (m ³ /d)		ENTRADA Total (m ³ /d)	SALIDA total (m ³ /d)
	Carga Constante	Almacena- miento	Carga Constante	Pozos		
Pozos existentes	27.659	4	9.823	18.080	27.663	27.903
Pozos existentes + 2 pozos futuros	30.762	5	8.010	22.880	30.767	30.890
Pozos existentes + 7 pozos futuros	37.048	6	2.221	34.880	37.054	37.101

Para ilustrar mejor el impacto del agregado de los nuevos pozos de agua subterránea en las vecindades del área piloto, se prepararon mapas de abatimiento comparando las condiciones actuales modeladas de las condiciones de descarga actual mostradas en la Figura 10, con los niveles de agua que se predicen adicionando dos y siete pozos (escenarios 1 y 2, como lo muestran las Figuras 11 y 12). Los conos de depresión resultantes se muestran en las Figuras 21 y 22 para los escenarios 1 y 2 respectivamente.

Como puede observarse en la Figura 21, la adición de 2 nuevos pozos en la porción noreste del área piloto resulta en un cono de depresión que se extiende mas allá del área piloto con abatimientos de aproximadamente 3 m en la esquina noreste de dicha área piloto y 1 m en la esquina suroeste. En la Figura 22 puede observarse que cuando se agregan 7 nuevos pozos a los pozos existentes, el cono de depresión se extiende más lejos de los límites del área piloto con un abatimiento de 6 m en ambas esquinas noreste y suroeste del área piloto.

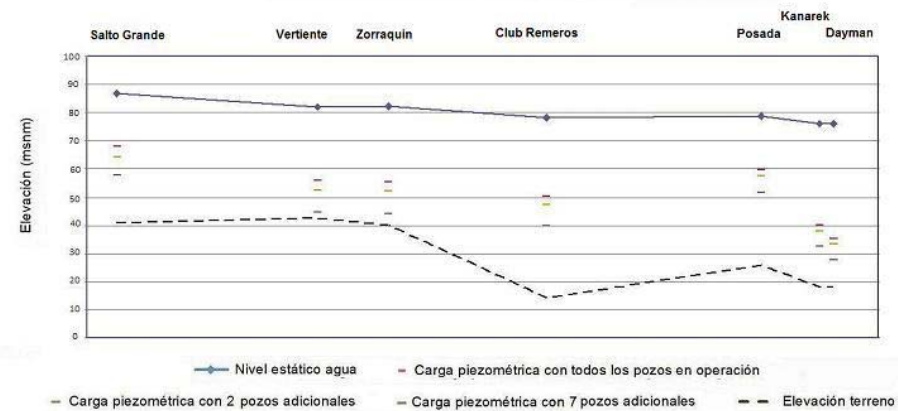
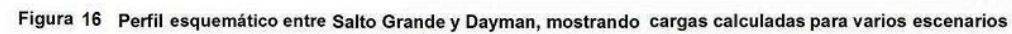
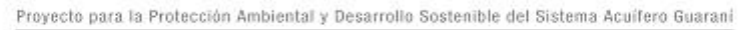




Figura 17 Perfil esquemático entre Salto Grande y Dayman, mostrando cargas calculadas para varios escenarios – Análisis de sensibilidad

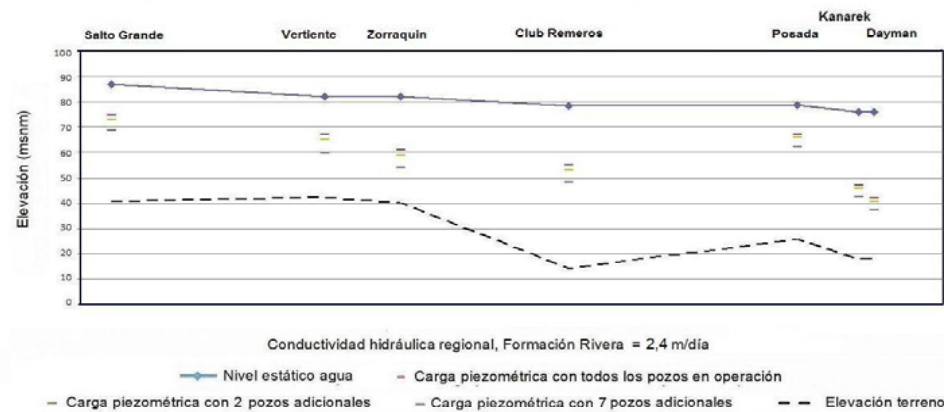
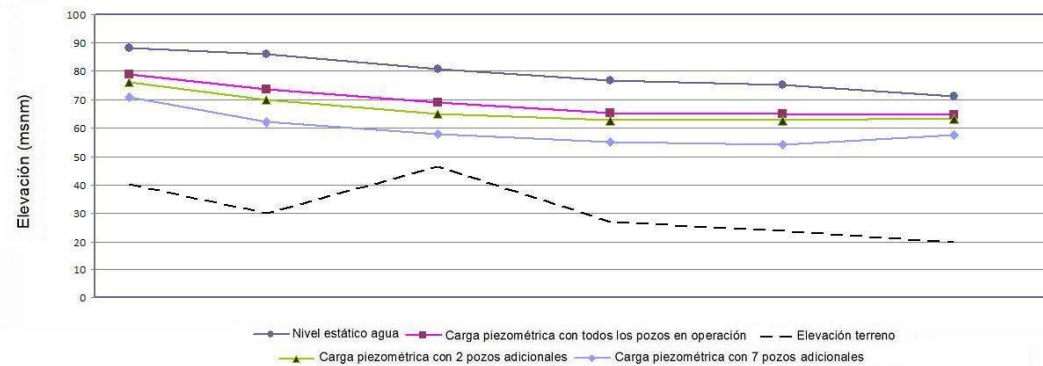




Figura 18 Perfil esquemático entre Noreste y Suroeste - Cargas calculadas para varios escenarios

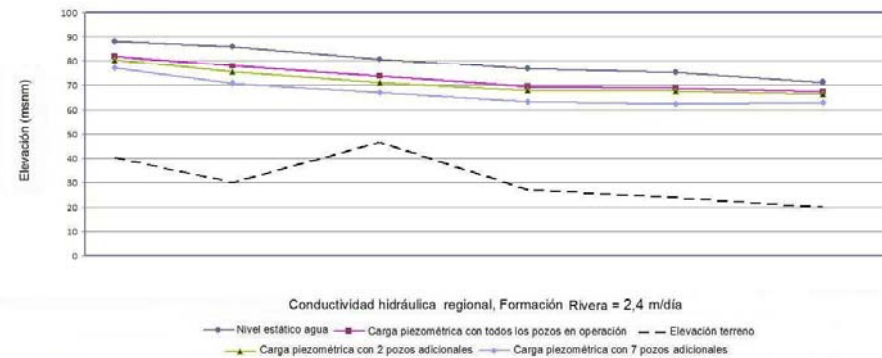


Esta figura muestra las elevaciones de las cargas piezométricas calculadas en seis puntos arbitrarios a lo largo de una línea que atraviesa el área piloto Concordia-Salto de Noreste a Suroeste. La figura no muestra las cotas en los pozos; da una indicación de los cambios en la superficie piezométrica general debido a los efectos de la extracción en los pozos existentes y posibles futuros. La línea verde es la superficie aproximada del terreno.

La Figura 20 muestra la ubicación en planta de este perfil



Figura 19 Perfil esquemático entre Noreste y Suroeste, mostrando cargas calculadas para varios escenarios – Análisis de sensibilidad

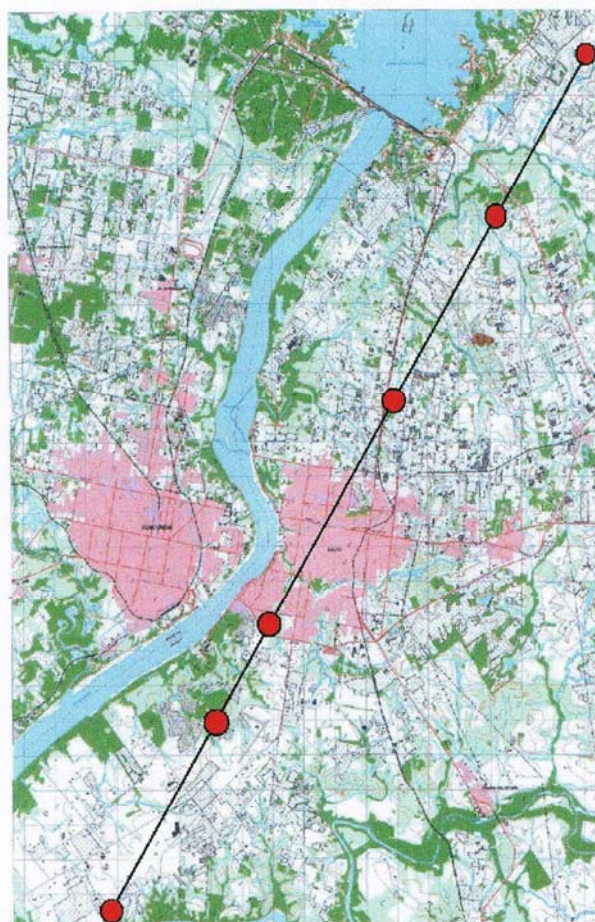


Esta figura muestra las elevaciones de las cargas piezométricas calculadas en seis puntos arbitrarios a lo largo de una línea que atraviesa el área piloto Concordia-Salto de Noreste a Suroeste. La figura no muestra las cotas en los pozos; da una indicación de los cambios en la superficie piezométrica general debido a los efectos de la extracción en los pozos existentes y posibles futuros. La línea verde es la superficie aproximada del terreno.

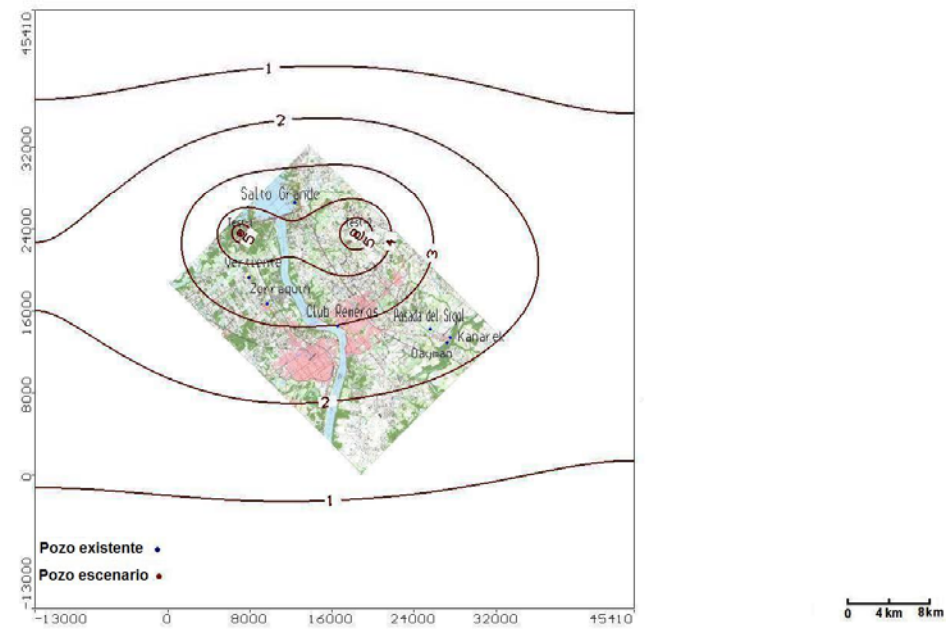
La Figura 20 muestra la ubicación en planta de este perfil



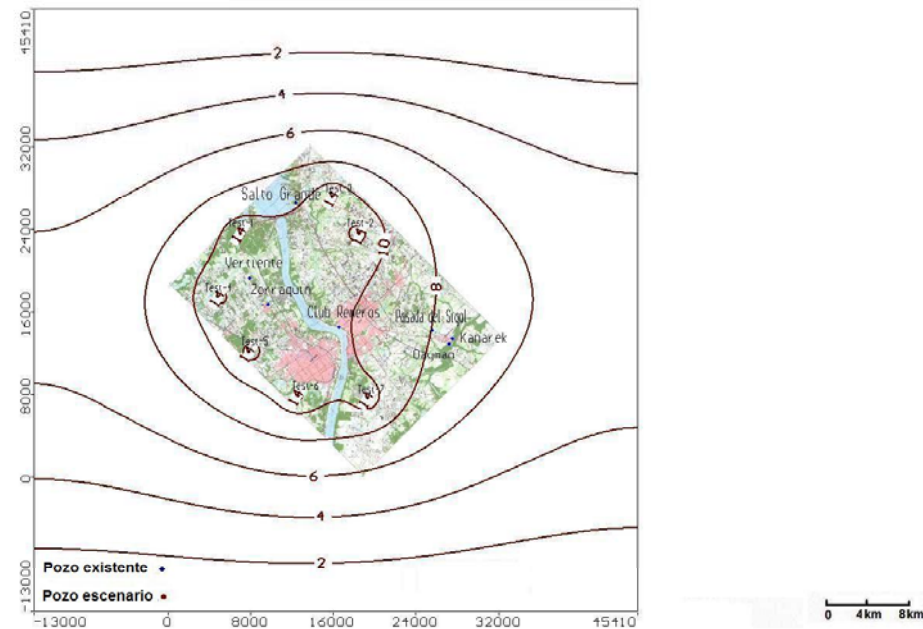
**Figura 20 Ubicación de secciones transversales
en Figuras 18 y 19**



Puntos con información ●



**Figura 21 Abatimiento –Escenario 1, luego de 15000 días
(Con 2 pozos adicionales)**



**Figura 22 Abatimiento - Escenario 2, Luego de 15000 días
(Con 7 pozos adicionales)**



6.0 CONCLUSIONES

Al crear o utilizar un modelo numérico de agua subterránea es importante recordar que esta es una herramienta para resolver problemas del agua subterránea pero que no es la solución en sí misma. Un modelo, sin importar qué tan sofisticado sea, nunca describirá el sistema de agua subterránea que se esté investigando sin que la simulación del modelo se desvíe de las condiciones físicas actuales (Spitz y Moreno, 1996).

Lo que es más importante, los mismos autores notaron que los modelos numéricos no brindan respuestas precisas a los problemas definidos de manera insuficiente. Teniendo esto en mente, se pueden obtener varias conclusiones con respecto al presente modelo Concordia-Salto. Ellas son:

- Parecería posible agregar dos nuevas perforaciones sin producir un impacto importante, siempre que no se ubiquen cerca de pozos existentes, aunque habrá cierto descenso regional de las cargas piezométricas en toda el área piloto
- Agregar nuevas perforaciones adicionales en el área piloto Concordia-Salto llevará a un nuevo descenso de las cargas piezométricas y podría, en el peor de los escenarios posibles, ocasionar la pérdida del flujo artesiano en algunos sitios.
- El modelo transitorio es sensible a los cambios en el valor de la conductividad hidráulica asignada a la unidad principal del acuífero

Existen también algunas conclusiones que se pueden obtener con respecto a las limitaciones reales o percibidas y/o deficiencias del presente modelo:

- Hay una aparente escasez de datos confiables con respecto al desempeño de las perforaciones existentes y a los cambios en su desempeño con el tiempo (es decir, faltan datos de niveles de agua en el tiempo) y, en algunos casos, falta información sobre tasas de extracción
- Existen limitaciones con respecto al modelo presente debido a la falta de límites laterales naturales en el agua subterránea dentro o cerca del área de estudio, por lo que se necesita la creación de límites de carga fija en dos lados del modelo
- Hay cierta falta de datos confiables acerca de los ensayos de descarga de las



perforaciones en el área piloto, debido principalmente a problemas logísticos; sin embargo, un análisis de los datos recopilados como parte del estudio y de ensayos anteriores en dos perforaciones, combinados con los análisis de ensayos de recuperación previos en el área, permitieron realizar una estimación de la conductividad hidráulica regional con un grado razonable de confianza – lo que permitió la construcción de un modelo viable.



7.0 RECOMENDACIONES

7.1 Escasez de información

En este capítulo se esbozan las limitaciones y deficiencias de los datos encontradas durante esta modelación y se presentan algunas recomendaciones que podrían abordar estas deficiencias.

Datos de la carga piezométrica. Aunque existe evidencia con respecto a la existencia de datos históricos de la carga piezométrica, ha resultado difícil obtener dicha información en forma confiable. Esto se aplica tanto a los niveles de agua estáticos iniciales tomados cuando se perforaron los pozos, a los datos temporales que cubren el período de funcionamiento de los pozos o incluso a los niveles de agua actuales precisos dinámicos y estáticos. Se cree que, en gran parte, esto se debe a las dificultades para recopilar datos confiables de los pozos con cargas artesianas muy altas (de hasta 50 m sobre el terreno). Esto requiere la toma de lecturas de presión y su conversión a carga lo cual, según han mostrado otras experiencias, puede conducir a errores significativos. Se recomienda que se tomen medidas para asegurar que se lleven registros buenos para cada pozo profundo en el área piloto tanto para la carga de extracción como para la carga piezométrica. En la sección 7.2 se esbozan algunas sugerencias con respecto a la frecuencia y tipos de recopilación de datos.

Características del Acuífero. Estas constituyen una parte importante en cualquier modelo y el presente ejercicio ha demostrado que el modelo es sensible a variaciones en la conductividad hidráulica. Ante la ausencia de buenos ensayos de descarga fue necesario basarse en trabajos anteriores como fuente para estos datos, principalmente para los ensayos de recuperación. A pesar de que estos datos tienen sus limitaciones, en el caso de este modelo proporcionaron una estimación de conductividad hidráulica que permitió la construcción de un modelo numérico viable. Sin embargo, los valores de conductividad hidráulica de los miembros inferiores del SAG y de las rocas Paleozoicas subyacentes dentro del área piloto son esencialmente el resultado de especulación. Se recomienda que se lleven a cabo investigaciones de campo, según se esboza más abajo en la sección 7.3, para obtener un mejor entendimiento de la incidencia y el movimiento del agua subterránea en las rocas Mesozoicas y las rocas Paleozoicas superiores.



Tasas de extracción. Aunque se contó con algunas tasas de flujo para la mayoría de los pozos, aparentemente no había registros de períodos largos que inspiraran confianza en su credibilidad. Esto no quiere decir que dichos datos no existan, al menos para algunos de los pozos, sino que no estaban en la base de datos que estuvo disponible para la modelación. Se deberían tomar medidas para asegurar que todos los propietarios de pozos termales en el área piloto mantengan buenos registros de extracción y que los datos se envíen regularmente ante un organismo central.

Condiciones de bordes. Debido a la naturaleza hidrogeológica inusual del área de estudio fue necesario imponer lo que se podría describir como condiciones “artificiales” de borde para dos límites laterales del modelo. Sin embargo se logró una calibración razonable. Se recomienda que, en algún momento, se extienda el dominio del modelo a fin de permitir la inclusión de más condiciones naturales de límite. Esto se esboza más adelante en la sección 7.4.

Los métodos para abordar las deficiencias mencionadas anteriormente se explican en las siguientes secciones.

7.2 Recolección de información a partir de las instalaciones existentes

Puede ser que parte o toda esta información ya esté disponible, sin embargo sería conveniente que todos los balnearios recopilen y presenten la siguiente información:

Enviar mensualmente a un organismo central los registros diarios de extracción, incluyendo las horas de funcionamiento y tasas de descarga. Las cargas piezométricas se deberían determinar con exactitud al menos una vez por semana y, de ser posible, esta debería registrarse tanto cuando el pozo esté descargando como cuando esté detenido. Por ejemplo, si el pozo funciona durante 16 horas al día y luego se detiene durante 8 horas, se debería tomar una lectura de la presión justo antes de detener el pozo y otra justo antes de encenderlo nuevamente.

Cada instalación debería ser visitada por una persona calificada y se deberían revisar los procedimientos para confirmar que se está recopilando la información correcta.

Una vez al año, y dos de ser posible, se deberían apagar simultáneamente durante 48 horas todos los pozos termales que se encuentren en el área piloto, midiendo las cargas



piezométricas antes de ser apagados y nuevamente luego de transcurridas las 48 horas, justo antes de que se enciendan los pozos. Se entiende que el uso de los balnearios termales es de alguna manera estacional, siendo su uso máximo en los meses de invierno, por lo que las detenciones semestrales se podrían realizar al comenzar y al terminar la temporada baja. El cierre y la recopilación de datos se deberían realizar bajo la dirección de una persona calificada. Las pruebas adicionales del acuífero se deberían realizar durante los períodos de cierre y encendido y bajo la supervisión de una persona calificada. Esto podría realizarse mediante un aumento gradual hasta que todos los pozos hayan sido ensayados.

7.3 Nuevas investigaciones

Se deberá considerar la perforación de un pozo de experimentación con el propósito específico de recopilar datos científicos relacionados con el Sistema Acuífero Guaraní. Debido a los problemas relacionados con las cargas artesianas altas en el área piloto, se sugiere que la perforación se ubique en algún punto entre el área de recarga (es decir, el área Rivera-Tacuarembó) y el área Concordia-Salto.

Con una cuidadosa selección, la perforación podrá ser ubicada en un área donde la carga piezométrica esté cerca del nivel del terreno y también podría estar en un área donde no hayan perforaciones profundas y donde hubiera, por lo tanto, escasez de información. De esta manera se podría llenar una brecha de información obvia.

La perforación se deberá realizar al menos hasta el fondo de la Formación Buena Vista, extrayendo testigos continuamente a través del SAG (incluyendo la Formación Buena Vista). Los testigos deberán ponerse a disposición de instituciones académicas para un registro geológico detallado y la perforación deberá ser sometida a una prueba de empacador para desarrollar un perfil de permeabilidad. Se deberán considerar los mejores métodos para obtener muestras de agua desde distintas profundidades y el mejor método para completar la perforación. Considerar, por ejemplo, la probabilidad de instalar muestreadores multi-niveles.

El costo de una perforación tal puede ser significativo, pero con planificación y asesoramientos apropiados, las ganancias en cuanto a conocimiento del SAG en el sector sur serían enormes.



7.4 Modelación futura

Una de las deficiencias del presente modelo numérico de Concordia-Salto es el hecho de que no existen límites naturales dentro del dominio del modelo. Se recomienda considerar la construcción de un modelo sub-regional que se extienda desde el área de recarga al este hasta más allá del área Concordia-Salto en el oeste.

Un modelo así tendría el potencial de ser una simulación más realista del régimen de agua subterránea, particularmente si incluyera los datos recopilados a partir de la perforación experimental descrita anteriormente en la sección 7.3, y combinaría los hallazgos de las áreas piloto Concordia-Salto y Rivera-Santana do Livramento.

Este modelo sub-regional se debería combinar con las tareas descritas en las secciones 7.2 y 7.3, con el fin de aprovechar los datos adicionales recopilados.

7.5 Desarrollo en etapas

Si se fueran a hacer perforaciones adicionales, entonces estas se deberían realizar únicamente dentro de un programa de desarrollo en etapas y durante un período de años. Luego de la construcción y activación de cada nueva perforación debería existir una moratoria en perforaciones hasta que se haya evaluado el alcance del impacto de esa perforación en las perforaciones existentes. Esto, por supuesto, presupone que se haya implementado realmente un sistema de monitoreo según se propone en la sección 7.2, y que sea capaz de detectar impactos.



REFERENCIAS

- Collazo P, Auge M, Montaña J, 2005. Vulnerabilidad y Riesgo Hidrogeológico del SAG en el Área Aflorante de Rivera, Uruguay. Fondo de Universidades, Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.
- De Santa Ana, H.; Fernández Garrasino, C.; Fulfaro, F., 2006. Proyecto para la protección Ambiental y Desarrollo sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay). Primer Informe Geológico. Consorcio Guaraní. Montevideo, Uruguay.
- Domenico, P. A., 1972. Concepts and Models in Groundwater Hydrology. McGraw-Hill, New York, USA.
- Fondo de Universidades, 2005. Investigación geofísica de la estructura geológica de la cuenca Chaco-Paranense, en un área centrada en las ciudades Salto(Uruguay) y Concordia (Argentina)
- Gilboa Y, Mero F, Mariano B, 1976. The Botucatú aquifer of South America, model of an untapped continental aquifer. Journal of Hydrology, 29, pp 165-179.
- Gilboa, Y., 1977. The groundwater resources of Uruguay. Hydrological Sciences, XXII, 1.
- Oleaga A, 1998. Ensayo de bombeo en Termas de Daymán (Inédito). Uruguay.
- Harbaugh, A.W., 1990. A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392, 46 p
- 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.
- Oleaga A, 2002a. Contribución a la Hidrogeología del Acuífero Guaraní en el Sector Uruguay. Un enfoque Integral. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas). Instituto de Geología. UNAM. México D.F., México.
- Oleaga A, 2002b. Estudio del funcionamiento conjunto de las perforaciones profundas en Termas de Daymán, propiedad de la Intendencia Municipal de Salto y Termal Kanarek S.A. Informe técnico. Daymán. Uruguay.
- Oleaga A, J. De los Santos, 2003. Nuevo análisis para la determinación de parámetros hidráulicos en pozos del acuífero Guaraní (Uruguay). Discusión comparativa. III Congreso Argentino de Hidrogeología. Rosario, Argentina. Septiembre 2003.
- Pesce A. H., 2001. The Guaraní Aquifer. A Good Prospect for Geothermal Development in Northeastern Argentina. Geothermal Resources Council Bulletin 30(5), 199-203.
- Pesce A.H., 2002. Thermal Spas: an Economical Development Alternative along Both Sides of The Uruguay River. GHC Bulletin, September 2002



- Piñeiro, G., C. Marsicano, & N. Lorenzo, 2007. A new temnospondyl from the Permo-Triassic Buena Vista Formation of Uruguay. *Palaeontology*, 50:627-640.
- Rodríguez L, A. Gómez, A. Oleaga, F. Pacheco, G. Roullier, N. Seoane, A. Silva Busso & L. Vives, 2006. Informe Final del proyecto “Desarrollo Metodológico para la Evaluación de la Recarga y la Vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní en Argentina y Uruguay”, Fondo de Universidades, Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.
- Spitz K. & J. Moreno, 1996. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Sracek O and R. Hirata, 2002. Geochemical and Stable Isotopic Evolution of the Guaraní Aquifer System in the State of Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal* Vol 10, pp 643-655.
- SNC-Lavalin, 2008. Hidrogeología de el Área piloto Concordia-Salto.
- Wang H.F., and M.P. Anderson, 1982. Introduction to Groundwater Modeling. W.H. Freeman and Co.,
- Waterloo Hydrogeologic Inc., 2005. Visual Modflow User`s Manual, version 4.1.0, Waterloo, Canada..