

Chuo Kaihatsu Corporation

JNS Engenharia, Consultoria e Gerenciamento s/c Ltda.

**“ESTUDIO DE POLITICAS Y MANEJO AMBIENTAL DE AGUAS
SUBTERRANEAS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE
ASUNCIÓN” (ACUÍFERO PATIÑO)**

**Informe técnico 2.12
Simulación Matemática**

**Fecha:
Mayo 2007**

Preparado por:

Waterloo Hydrogeologic, Inc. a Schlumberger Company

Autor:

Walid Labaky

Contrato:

Cooperación Técnica ATN/JC - 8228 – PR – SENASA - BID

CONSORCIO CXC-JNS

- Figura 2.6 Mapa de vulnerabilidad del Acuífero Patiño
- Figura 4.1 Representación del área del modelo numérico
- Figura 4.2 Condiciones de borde en el modelo numérico
- Figura 4.3 Zona del modelo en 3-D
- Figura 4.4 Conductividades hidráulicas en 3D
- Figura 4.5 Corte de conductividades hidráulicas
- Figura 4.6 Cuencas hidrológicas del Acuífero Patiño
- Figura 4.7 Cargas hidráulicas calculadas vs. Cargas medidas en los pozos del acuífero
- Figura 4.8 Niveles de agua en el área del modelo
- Figura 4.9 Escenario 1 – Abastecimiento en el área del estudio, condiciones del año 2005
- Figura 4.10 Escenario 2 – Abastecimiento en el área del estudio en 2035 comparado a 2005
- Figura 4.11 Escenario 3 – Dirección de flujo en el Acuífero Patiño en condiciones de sequía (1976)
- Figura 4.12 Escenario 1 - Zonas de protección de pozos con 15% porosidad
- Figura 4.13 Escenario 1 - Zonas de protección de pozos con 3% porosidad
- Figura 4.14 Escenario 2 - Zonas de protección de pozos con 15% porosidad
- Figura 4.15 Escenario 2 - Zonas de protección de pozos con 3% porosidad
- Figura 4.16 Escenario 3 - Zonas de protección de pozos con 15% porosidad
- Figura 4.17 Escenario 3 - Zonas de protección de pozos con 3% porosidad
- Figura 4.18 Niveles de concentración de cloruro disponibles en y alrededor del Acuífero Patiño
- Figura 4.19 Pozos con concentraciones de cloruro > 100 mg/l
- Figura 4.20 Intersección del frente salino con las zonas de protección 2005 a 15% porosidad
- Figura 4.21 Intersección del frente salino con las zonas de protección 2005 a 3% porosidad

1.0 Introducción

1.1 Fondo

El acuífero Patiño lleva a cabo un papel económico e hidrogeológico importante en el área de Asunción y del país en general. El acuífero ocupa un área de 1172 km² donde viven aproximadamente dos millones de personas. La densidad de la población y el nivel de actividades industriales y agrícolas constituyen una amenaza seria en la calidad y la cantidad de los recursos de agua subterránea dentro del área del estudio. Estudios anteriores, dentro o alrededor del área han tratado temas diversos como ser geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos. Las referencias consultadas incluyen:

Desarrollo del Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos- Informe técnico (Van der Linden, 2001), Variación Espacial de los Excesos y Déficit Hídricos en el Paraguay (Báez Benítez and Monte Domecq), The major Discharge Events in the Paraguay River: Magnitudes, Sources Regions and Climate Forcings (Barros et al, 2004).

El actual informe también ha consultado informes anteriores y los documentos publicados dentro del curso del estudio es decir:

Informe Técnico 2.2 Geología Área del acuífero Patiño (Carlos Figueredo, 2007)

Informe Técnico 2.3 Inventario de pozos (Andrés Wehrle, 2007)

Informe Técnico 2.4 Investigación geofísica – Sondeos Eléctricos Verticales (Koichi Sekita y Andrés Wehrle, 2007)

Informe Técnico 2.11 Balance Hídrico del acuífero Patiño (Roger Monte Domecq, y Julián Báez, 2007)

Informe Técnico 2.13 Plan de Gestión del Acuífero Patiño (Tobias Jerozolimski, 2007).

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es construir un modelo numérico tridimensional para el acuífero Patiño usando la información de campo disponible. El modelo debe poder describir el comportamiento del sistema de agua subterránea bajo varias condiciones operacionales. El modelo fue utilizado para simular el flujo de agua subterránea bajo condiciones de estado estacionario del flujo. La modelación de transporte advectivo fue utilizada para determinar las zonas de captura alrededor de pozos importantes de producción. Éstas formarán la base para establecer las zonas principales de protección alrededor de los recursos principales. Las zonas de captura de pozos de fueron delineadas utilizando el método de “Particle Tracking” bajo condiciones de bombeo actuales y proyectadas.

1.3 Estrategia de Modelación

Los pasos implicados en la modelación incluyen:

- 1) Compilación de los datos para crear el modelo numérico
- 2) Análisis de los datos de campo disponibles
- 3) Formulación del modelo conceptual
- 4) Desarrollo y calibración del modelo numérico
- 5) Simulación de escenarios deseados
- 6) Análisis de “Particle Tracking” bajo los escenarios considerados
- 7) Delineación de las zonas de captura de pozos

Uno de los desafíos primarios en el desarrollo de un modelo numérico realista para la simulación de flujo subterráneo es el de establecer condiciones de borde válidas; tales que las influencias falsas de bordes están prevenidas. Los bordes del dominio necesitan estar suficientemente lejos de las zonas principales de estudio dentro del área del estudio para evitar afectar la solución numérica. La obtención de las condiciones de borde apropiadas para un modelo puede ser una tarea difícil. Idealmente, cada sistema necesita ser extendido a los límites físicos del sistema. Sin embargo, esto no es a menudo práctico porque para simular sistemas de flujo regionales, el nivel de discretización deseado en el área del estudio puede ser limitado por limitaciones de computación y/o debido a una carencia de datos detallados en las regiones lejanas al área de interés.

Un número de hipótesis de simplificación eran necesarias para completar las simulaciones numéricas en este estudio. Una de las hipótesis más importantes es que, en todos los escenarios considerados, el flujo fue asumido bajo condiciones de estado estacionario. Es decir las condiciones transitorias no eran consideradas. Esta era una hipótesis necesaria puesto que todos los datos disponibles del agua subterránea eran medidas aisladas y no hay información regular del muestreo o de monitoreo disponible. Debido a la historia de bombeo prolongada en el acuífero Patiño y a la luz del objetivo de este estudio para determinar el comportamiento a largo plazo del acuífero (hasta 30 años), esta hipótesis se considera ser válida.

Otra hipótesis importante es que la arenisca fina a media que constituye la zona acuífera principal se comporta como un medio poroso equivalente en una escala regional. Esta hipótesis estipula que el modelo que divide el dominio en un número finito de elementos o celdas diferentes, atribuirá las características gruesas a cada celda del modelo. Por lo tanto, las características de flujo a escala gruesa se representan en el modelo más bien que las características de pequeña escala. Ésta es generalmente la norma para los modelos regionales de agua subterránea al igual que el caso del actual estudio. En efecto, la caracterización realizada en el actual estudio es la escala regional. Los sondeos eléctricos verticales a través del área del estudio formaron la base para asignar las unidades hidro-estratigráficas.

Otro tipo de caracterización a gran escala era la evaluación de características hidráulicas. Los valores de conductividades hidráulicas dependen de la escala del método utilizado para evaluarlos (los pruebas de laboratorio, prueba slug, pruebas de bombeo,...). En el caso del estudio, los valores de conductividad hidráulica calculados (Informe Técnico 2.8 Ensayos de Bombeo; Koichi, Sekita; Wehrle Andrés, 2007) fueron a partir de ensayos de bombeo y entonces representan una escala grande

Durante la etapa de calibración, las características hidráulicas se asignan generalmente a la unidad hidro-estratigráfica entera para evitar singularidades innecesarias en el régimen de flujo. Consecuentemente, las características de una escala más pequeña son representadas en el modelo solamente donde este justificado basado sobre la información de perforación disponible. Una porosidad uniforme fue asumida para la formación en el acuífero principal del Patiño. Sin embargo, dos escenarios fueron elegidos en el cálculo de las áreas principales de protección de pozos. El primer escenario asumió que el flujo se dominará por la porosidad primaria (de la matriz). Esta porosidad tendría un valor de 15% aproximadamente el caso de las areniscas. En el segundo escenario, se consideró el flujo como dominado por la porosidad secundaria (o de fracturas) y en este caso un valor de 3% fue utilizado.

La hipótesis final necesaria para la terminación de los escenarios predictivos era la incorporación de estimaciones de tasas de bombeo futuro en los pozos privados y sus distribuciones geográficas. En ausencia de información sobre la ubicación de estos pozos, las tasas fueron distribuidas entre los pozos públicos disponibles. Si datos más

exactos sobre el consumo de pozos privados y sus distribuciones espaciales llegan a estar disponible en el futuro (debido a una legislación decretada u otros medios), será recomendable poner al día el modelo con los datos nuevos. Estas hipótesis serán explicadas más detalladamente en las secciones correspondientes de este informe.

SIMULACION MATEMATICA

2.0 Análisis de Datos de Campo

2.1 Manejo de datos

Los datos hidrogeológicos disponibles fueron compilados en una base de datos ACCESS titulada “Paraguay Well Information System” (PWIS). Cada pozo se asigna una identificación única con un nombre correspondiente atribuido por la autoridad responsable. La base de datos de PWIS distribuye la información de pozos bajo 7 títulos principales: Tubería, Filtro, Litología, Nivel de Agua, Descarga, Calidad de Agua y Pruebas de Bombeo.

Las informaciones cargadas bajo las categorías Tubería, Filtro y Litología contienen informaciones que pueden variar con la profundidad. Las categorías Tubería y Filtro describen el diámetro y el tipo de material instalado en el pozo y las profundidades en los cuales fueron instalados. La categoría Litología enumera los tipos de litologías encontrados durante la perforación y sus descripciones, según los informes de pozos disponibles.

La categoría “Nivel de Agua” permite el almacenaje de las medidas del nivel del agua de diversas campañas de monitoreo. En efecto, varias medidas y sus fechas correspondientes pueden ser almacenadas. Se puede enumerar la descarga del pozo bajo la categoría “Descarga” y la categoría “Calidad del Agua” almacena los resultados de análisis de agua. Una lista completa de parámetros químicos fue preparada en la base de datos para facilitar la entrada de datos y para prevenir errores mecanográficos.

Informaciones de pruebas de bombeo se pueden almacenar bajo de la categoría “Prueba de Bombeo”. Esta categoría incluye los parámetros calculados durante las pruebas de bombeo como la conductividad hidráulica. Una última categoría intitulada “Documentos” permite el almacenaje de documentos originales digitales de cada pozo para referenciar los datos entrados. Puesto que la mayoría de los archivos de pozos existentes están en formato de papel, y para permitir una verificación rápida de los documentos originales en caso de que cierta información pareciera cuestionable, un vínculo se ha construido para permitir el acceso directo desde PWIS a los documentos requeridos, a condición que sean cargados en la carpeta indicada. Este diseño permite de reducir al mínimo el impacto de errores durante la transferencia de datos manuales,

Una descripción completa del sistema PWIS y su manejo se presenta en el ANEXO 7.1. Un total de 212 pozos fue compilado en PWIS: 172 pozos de producción y 40 pozos de observación. La información fue utilizada en la interpretación litológica de datos.

2.2 Análisis de Datos de Pozos

Los datos de pozos disponibles en el Acuífero Patiño se pueden agrupar generalmente bajo dos categorías principales: pozos de observación y pozos de producción. La Figura 2.1 presenta la distribución de los pozos a través del área del estudio. Los pozos de producción son los pozos públicos que fueron perforados adentro del área antes del estudio actual. Sin embargo, los pozos públicos no representan la totalidad del consumo de agua subterránea en el Acuífero Patiño puesto que un número mucho más alto de pozos privados se sabe que existen. Sin embargo, no hay información exacta disponible sobre las localizaciones, las profundidades o las tasas de bombeo de los pozos privados.

Los pozos de observación (Figura 2.1) fueron perforados dentro del actual estudio. Las localizaciones fueron elegidas principalmente para llenar el vacío en la información hidrogeológica a través del acuífero. Sin embargo, estos pozos proporcionan información importante sobre las condiciones hidrogeológicas en el sitio durante el mismo periodo del año (los pozos fueron perforados aproximadamente durante del mismo periodo). Esta información temporal es muy importante para la correlación de niveles de agua y en consecuencia para la determinación de la dirección de flujo en el acuífero. Anteriormente, las informaciones disponibles de pozos de producción tenían datos de periodos diferentes según la fecha de perforación de cada pozo.

Los niveles de agua en los pozos de observación y de producción fueron interpolados para desarrollar un mapa de isolíneas de niveles del agua (Figura 2.2). De acuerdo con los contornos generados, es posible ver la dirección regional del flujo en el área del estudio que se parece ir hacia fuera del centro en dirección de los bordes del acuífero. El sentido de flujo indica que la forma principal de recarga del acuífero proviene de la precipitación donde la infiltración incorpora el sistema de arriba y consigue distribuida hacia fuera basado en las condiciones hidrogeológicas del sistema.

Las informaciones disponibles de ensayos de bombeo en los pozos públicos fueron compilados (Informe Técnico 2.8 Ensayos de Bombeo; Koichi, Sekita; Wehrle Andrés, 2007). Esta información fue utilizada para compilar los valores de conductividad hidráulica (K) y para determinar el valor promedio en el área del acuífero. Los valores de conductividades hidráulicas se distribuyen generalmente de manera logarítmica. Por lo tanto, el logaritmo de cada valor de K fue calculado, y el valor promedio de los logaritmos fue calculado y después invertido para determinar el valor lineal de K. Esto dio un valor medio de K de 4.76×10^{-6} m/s en el caso de la formación productiva.

Nombre	Fecha	Duración (s)	Abastecimiento (m)	Descarga (m ³ /s)	Conductividad (m/s)
CL-P0001	5/30/1995	2035	27.49	0.00556	4.83E-06
CL-P0002	6/1/1995	515	107.14	0.00417	3.80E-07
CL-P0003	8/31/1998	1081	33.40	0.0111	1.27E-05
CL-P0008	6/23/1995	2031	12.76	0.00417	1.10E-05
CL-P0009	1/2/1994	1821	18.30	0.00556	1.12E-05
CL-P0011	5/11/1995	1880	44.65	0.00417	2.80E-06
CL-P0013	5/12/1995	2880	19.80	0.00762	1.15E-05
CL-P0016	9/22/1994	2546	5.60	0.00667	4.39E-05
CL-P0019	7/20/1995	2226	44.86	0.00583	3.72E-06
CL-P0022	5/18/1995	1795	26.50	0.00613	6.95E-06
CL-P0024	4/5/1995	3112	10.88	0.00667	2.61E-05
CL-P0025	5/13/1995	1806	18.77	0.00667	1.19E-05
CL-P0029	6/20/1995	2060	15.16	0.00417	9.22E-06
CL-P0039	6/15/1995	2050	32.99	0.00306	3.11E-06
CL-P0040	6/28/1995	1690	31.62	0.00417	3.42E-06

Nombre	Fecha	Duración (s)	Abastecimiento (m)	Descarga (m ³ /s)	Conductividad (m/s)
PG-P0186	3/18/2003	3841	15.09	0.00143	2.84E-06
PG-P0198	11/28/1995	2881	15.17	0.000931	2.06E-06

Tabla 2.1 Resultados de ensayos de bombeo en pozos públicos del Acuífero Patiño (fuente CKC)

2.3 Análisis de Sondeos Eléctricos Verticales

Sondeos eléctricos verticales (SEV) fueron realizados por CKC dentro del estudio. La Figura 2.3 indica las ubicaciones de las secciones en el área del proyecto. En total, 5 secciones transversales (AA, BB, CC, DD, EE, FF, GG, HH) y 4 secciones longitudinales (Línea NW-SE A, AH, BH, AG) fueron preparadas por CKC y fueron correlacionados con las propiedades litológicas del acuífero. Los SEV identificaron 4 zonas diferentes K1, K2, K3 y K4.

En el presente estudio, la modelación del Acuífero Patiño fue realizada a una escala regional. Por lo tanto, las propiedades de gran escala fueron utilizadas en la descripción del modelo. Cuando necesario, una confirmación de las propiedades al nivel local fue alcanzada refiriendo a las propiedades de pozos. Los resultados de las investigaciones de campo fueron revisados e integrados en esta sección para desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual del área del estudio. El modelo conceptual regional fue desarrollado usando los SEVS obtenidos por CKC en el área del Acuífero Patiño.

2.4 Evaluación de la Vulnerabilidad

Un mapa de vulnerabilidad del área fue preparado basado sobre las normas recomendadas por el banco mundial para las autoridades, las agencias y los municipios de agua (Foster et al, 2002). La metodología se basa sobre dos criterios principales para determinar la vulnerabilidad: la litología y la profundidad del nivel freático (o profundidad de la cima del acuífero en el caso de un acuífero confinado). Según la metodología, las características litológicas se atribuyen un factor que se extiende de 0.4 a 0.8 para sedimentos no consolidados que se extienden en tamaño desde los suelos residuales hasta las gravas aluviales. Un factor que se extiende entre 0.5 y 0.9 se atribuye a los materiales porosos consolidados que se extienden en tamaño desde la arcilla hasta las calcarenitas dependiendo del grado de fracturación. Finalmente, un factor de 0.8 a 1 se atribuye a las rocas fracturadas no porosas que se extienden en tamaño desde las lavas volcánicas recientes a las formaciones kársticas.

Según la profundidad al agua, un factor de vulnerabilidad igual a 0.9 se atribuye para profundidades < 5m, 0.8 para las profundidades entre 5 y 20 m, 0.7 para las profundidades del agua entre 20 y 50 m y un factor de 0.6 a las profundidades más altas que 0.6. Un factor de vulnerabilidad de 1 se da en el caso de rocas altamente fracturada (karstic,...) sin importar la profundidad del agua.

La cuenta total de vulnerabilidad será el producto del factor litológico con el factor de profundidad. El producto de los dos factores generará una escala de vulnerabilidad como sigue:

Cuenta	Vulnerabilidad
0 - 0.1	Despreciable
0.1 - 0.3	Baja
0.3 - 0.5	Media
0.5 - 0.7	Alta
0.7 - 1	Extrema

Tabla 2.2 Cuenta de vulnerabilidad basada sobre la litología y el nivel del agua subterránea (Foster et al, 2002)

La metodología presentada apunta ser un guía universal permitiendo los ajustes en función de las características locales de varias zonas geológicas (Gomes, comunicación personal). En el caso del Acuífero Patiño, las cuentas siguientes de vulnerabilidad fueron atribuidas en función de las características litológicas descritas en el mapa geológico del área (Figura 2.4). Las cuentas de vulnerabilidad son:

- El Cuaternario (todos tipos): 0.75
- Materiales magmáticos y volcánicos: 0.4
- El Proterozoico cristalino: 0.4
- La arenisca y todas las formaciones sedimentarias: 0.8

La zona del estudio se considera un acuífero no confinado. Como tal, la profundidad del agua era el segundo parámetro requerido para la evaluación de la vulnerabilidad. La profundidad del agua fue determinada en ArcGIS restando el mapa de contorno del agua (Figura 2.2) del mapa de elevación digital (Figura 2.5) ya presentado en el informe anterior de SWS intitulado: Informe de Visita (Febrero, 2006). Cada celda resultada fue atribuida un factor basado sobre el valor de profundidad como indicado en la metodología de Foster et. al (2002).

El mapa de vulnerabilidad fue generado para el área del estudio (Figura 2.6). La mayor superficie del área se clasifica como zona de alta vulnerabilidad. Esto se debe a las características de permeabilidad de las formaciones sedimentarias (principalmente de arenisca) en el Acuífero Patiño. El resultado también corrobora informes sobre niveles crecientes de la contaminación a través del área del estudio (Jerzolimski, T., 2007).

Las zonas extremas de vulnerabilidad (Figura 2.6) corresponden a los depósitos aluviales que forman los fondos de ríos. Sin embargo, considerando que estas áreas corresponden a zonas de descarga hidráulica, su amenaza al sistema hidrogeológico puede ser menos que las otras zonas. Por lo tanto, estas áreas se han identificadas en la Figura 2.6.

La tercera categoría de vulnerabilidad en el área del estudio es la categoría media. Estas zonas están ubicadas principalmente en áreas elevadas donde es más difícil de evaluar la profundidad del nivel de agua por métodos de interpolación. Por lo tanto se recomienda de confirmar donde posible los niveles del agua en pozos existentes (pero no investigados en este estudio). Finalmente, una porción muy pequeña del acuífero fue clasificada bajo la categoría de baja vulnerabilidad. Estas áreas corresponden a las zonas donde las intrusiones ígneas de muy baja permeabilidad afloran. No se encontró ninguna agua en pozos en tales sitios según los archivos de perforación.

3.0 Modelo Hidrogeológico Conceptual

3.1 Descripción del modelo

Basado en los resultados de sondeos eléctricos verticales y en las informaciones de perforaciones disponibles, un modelo conceptual del área del estudio fue preparado. Como morfología, el área del estudio se puede describir como una cuenca triangular de algunos 300m de profundidad, aproximadamente 65 kilómetros de largo y con una anchura aproximada máxima de 30 kilómetros. La unidad litológica principal ocupa la zona central de la cuenca y está rodeada de los lados y del fondo por una unidad de más baja conductividad.

La recarga del acuífero es principalmente de la precipitación. Los ríos y sistemas de drenaje constituyen la descarga natural principal del sistema. La descarga antropogénica se atribuye al bombeo de pozos privados y públicos cuyo número se estima ser alrededor de 1400 pozos. Sin embargo, la información estaba solamente disponible para los pozos públicos y éstos fueron utilizados en la sección de modelación.

Las condiciones de borde se presentan como sigue:

Los bordes Norte y Sur del acuífero son barreras impermeables donde la dirección principal del flujo es paralela al borde. Al lado noroeste, la frontera con el Río Paraguay constituye un borde permeable que permite el flujo desde o hasta la zona del estudio en proveniencia o a destino de las formaciones vecinas. Finalmente, debajo del Acuífero Patiño existe una formación impermeable que prohíbe la percolación del agua.

3.2 Unidades Hidro-Estratigráficas

La geología del área del estudio fue descrita en detalle por Figueredo (2006) dentro del presente estudio. El informe describe los diversos grupos y formaciones geológicas a través del área por ejemplo: el Grupo Asunción, la Formación Patiño, la Formación Yaguarón... Los grupos y formaciones geológicas son predominantemente representados por una sucesión de depósitos sedimentarios clásticos y aluviales en origen. La litología consiste en una mezcla de conglomerados, areniscas conglomeráticas, areniscas arcillosas y arcillas.

Cuatro unidades hidroestratigráficas principales fueron identificadas y convenidas durante la reunión con SENASA el 9 de Febrero de 2006:

- La unidad principal del acuífero representada por su designación de conductividad hidráulica K1. Esta unidad consiste en una arenisca fina a media con areniscas gruesas ocasionales. El valor de K1 fue determinado a partir de los ensayos de bombeo en los pozos productores como fue descrito anteriormente.
- La segunda unidad, K2, tiene una conductividad hidráulica más baja que K1. Su litología consiste en conglomerados con una matriz de arenisca o una matriz de arenisca arcillosa. Según los registros compilados en este estudio, no hay ningún pozo perforado en esta zona”. En consecuencia, no había resultados de ensayos de bombeo para determinar un valor de K.

Por lo tanto, hemos hecho un análisis de sensibilidad sobre el valor de K2. Como las zonas de distribución de K2 son limitadas con respecto al resto del acuífero, y como no hay pozos de producción públicos en estas zonas, el valor de K2 no tenía un efecto significativo sobre el resultado de la simulación. Por lo tanto, hemos dado un valor igual a K3 para evitar la adopción de un valor arbitrario sin justificación. Esta es una aproximación conservativa porque conociendo que en realidad K2 debería ser $> K3$, la adopción de un valor de K2 inferior a lo que debería en teoría evitara la sobrestimación de los recursos hidráulicos. (Pero en el caso del modelo el valor de K2 no tenía efectos).

- La unidad basal del acuífero está representada por su conductividad hidráulica K3. Se constituye por un conglomerado de origen aluvial (fanglomerático), y forma el piso del acuífero con una conductividad hidráulica perceptiblemente más baja que K1. Por definición, un acuitardo se caracteriza por una conductividad hidráulica máxima de dos ordenes de magnitud inferior a la conductividad del acuífero que lo sobre yace. En consecuencia el valor de K3 adoptado fue de dos órdenes de magnitud inferior a K1.

- Intrusiones de roca ígnea que se consideran prácticamente impermeables. Se señalan como K4 e intersecan las unidades anteriores como intrusiones en áreas localizadas. La unidad está localizada en zonas limitadas y discontinuas del acuífero. Según el registro de pozos compilado en este estudio, los pozos perforados en esta unidad no tienen agua y en consecuencia K4 fue considerada como zona no productiva.

El espesor máximo de la capa K1 fue la cosa de una gran incertidumbre durante el presente estudio. Los sondeos eléctricos verticales realizados no pudieron lograr la profundidad total de la unidad en todas las localizaciones a través del acuífero. La perforación de pozos exploratorios (300 m) fue propuesta para resolver esta situación y así también de esta manera verificar los valores interpretados en los SEV con la perforación del pozo. En estas localizaciones la profundidad total todavía no había sido lograda al realizar la modelación, pero si ya se contaba con la información necesaria para definir la profundidad de modelación. Por lo tanto, fue decidido considerar el espesor máximo de la unidad principal del acuífero como 300 m. Las capas antedichas son representadas numéricamente en la sección 4.3.

4.0 Modelación Matemática

4.1 Visual MODFLOW 4.2

El software MODFLOW del USGS es el modelo tridimensional de flujo y de transporte de agua subterránea es el más ampliamente utilizado en Norteamérica. Soluciona las ecuaciones de flujo y de transporte subterráneo usando el método de diferencias finitas. Puede incluir heterogeneidad, anisotropía y componentes del agua superficial (como drenaje, recarga, ríos...).

Visual MODFLOW V 4.2. fue seleccionado como el software más conveniente para este estado de la modelación del Acuífero Patiño. Esta versión es la más reciente de la gama de softwares desarrollados por Waterloo Hydrogeologic Inc. Utiliza el código numérico MODFLOW 2000 con un interfaz gráfico para entrar características o archivos de acuíferos, modificarlos y exportarlos después a otras herramientas. La interfaz también permite una representación visual avanzada de los resultados.

El paquete MODPATH dentro de Visual MODFLOW fue utilizado para el cálculo de zonas de protección de pozos utilizando el método de “Particle Tracking”. También fue utilizada la Herramienta Zone Budget durante la calibración para comprobar valores medidos de caudales de base y los valores calculados por el modelo en las diferentes cuencas. Además del paquete y herramienta presentados, Visual MODFLOW tiene otros paquetes para diferentes aplicaciones. Estos paquetes son listados en el manual del software.

4.2 El Modelo Numérico

La sección siguiente describe paso a paso el proceso para construir el modelo numérico basado sobre las hipótesis del modelo conceptual descrito arriba. El primer paso fue importar el mapa geológico de base en su formato SIG (archivo .shp) con todos los archivos asociados. Los archivos se almacenan primero en la carpeta “mapas” creada con el modelo. La función “Import” en Visual MODFLOW utilizará automáticamente los archivos necesarios cuando los archivos “.shp” son seleccionados.

Para mejores resultados numéricos, se recomienda generalmente orientar el dominio del modelo en la misma dirección que el flujo principal. En el caso del Acuífero Patiño, la dirección de flujo está dirigida generalmente hacia fuera del centro del acuífero como resultado de recarga por la precipitación. En este caso, ningún sentido de flujo predominante existe. Por lo tanto, el dominio del modelo fue rotado de manera casi arbitraria según las indicaciones de la Figura 4.1.

El área del estudio fue dividida en celdas iguales de 500 x 500m de tamaño, con un total de 76 filas y de 143 columnas (Figura 4.1). Para evitar computaciones innecesarias que desaceleran el modelo, las áreas fuera de la zona de interés fueron desactivadas. Incluida en el área desactivada era la zona fuera de los cerros al lado del lago Ypacarai. Esta área fue cortada porque se ubica al otro lado de los cerros y entonces pertenecen a otra cuenca ubicada al exterior del área del estudio. Una opción alternativa habría sido extender el límite exterior del área; sin embargo, informaciones geológicas e hidrogeológicas adicionales habrían sido requeridas.

El tercer paso era importar el modelo de elevación digital ya desarrollado en SIG a partir de mapas topográficos, fotos aéreas y verificaciones de GPS. El modelo de elevación digital fue formateado como texto a espacio delimitado “.CSV” en SIG. Durante la importación en Visual MODFLOW, la opción “World Coordinates” fue seleccionada.

Los pozos de observación fueron importados como archivos “.CSV” también. Cada pozo contiene la información siguiente: Nombre del pozo, Coordenada X, Coordenada Y, Identificación del filtro (1,2,3... en el caso que haya niveles múltiples de filtros), Elevación del filtro, Tiempo de observación y la carga hidráulica medida. El archivo .CSV de pozos fue preparado originalmente en Excel. Los pozos de observación se exhiben en azul en el dominio del modelo (Figura 4.1). El mismo procedimiento fue repetido durante la importación de pozos de bombeo después de la adición de una columna para la descarga. Los valores de la descarga tienen que ser incorporados con un valor negativo para indicar una salida del sistema subterráneo. La información de pozos de bombeo fue enumerada en la Tabla 2.1. Los pozos de producción se exhiben en rojo en el dominio modelo (Figure 4.1).

El mapa de ríos y del agua superficial fue importado de SIG en el formato “.shp” como el mapa geológico. Una condición de borde del tipo “DRAIN” fue asignada a las celdas que coincidían con los ríos (Figura 4.2). Esta condición de borde indica que el río será utilizado como zona de drenaje cuando el nivel de agua en el modelo esta más arriba que la elevación del fondo del río. Dentro de las características de la condición “DRAIN” se necesita especificar el parámetro de conductancia. Un alto valor de conductancia fue asignado al principio para asegurar que el exceso del agua en el acuífero drenará hasta los ríos. Sin embargo, una precaución se debe hacer contra asignar un valor de conductancia muy alto porque generará un balance de masa malo. La elección de los valores convenientes constituye el trabajo de calibración y será descrito en la Sección 4.4. Los valores de conductancia que finalmente fueron adoptados después de la calibración del modelo son presentados en la misma sección.

La Figura 4.3 demuestra el dominio del modelo en tres dimensiones. El área tiene aproximadamente 65 kilómetros de largo y 35 kilómetros de ancho. De acuerdo con la información litológica recibida del campo, las perforaciones de exploración habían alcanzado una profundidad máxima de algunos 300 m sin necesariamente alcanzar el piso. Por lo tanto fue decidido de construir el modelo con una profundidad de 300 m y donde la unidad de conductividad K3 fue definida (Figura 4.4).

Las capas hidráulicas dentro del modelo fueron definidas según el modelo conceptual (Sección 3.2). Las capas en el modelo fueron asignadas un valor de conductividad hidráulica en función de las características litológicas ya presentadas. Una sección representativa en la dirección longitudinal del dominio demuestra la distribución en profundidad de las conductividades hidráulicas (Figura 4.5). La figura demuestra también cómo las características hidrogeológicas se atribuyen numéricamente en el modelo.

4.3 Condiciones de Borde

De acuerdo con los datos de campo compilados, una conceptualización de las condiciones de borde se ha logrado junto con el departamento de geología en SENASA. El área del estudio se puede representar como una cuenca triangular, con dos bordes impermeables (No Flow Boundary) (Figura 4.2). En estos bordes, el flujo de agua subterránea será paralelo a estos límites y no podrá cruzarlos.

A la frontera con el Río Paraguay, se estableció un borde permeable y fue asignado un valor constante de carga hidráulica basado sobre el valor medio de elevación del río determinado de la 90m resolución SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, Febrero de 2000). Por lo tanto, dependiendo de la carga hidráulica en el acuífero, el agua subterránea podrá fluir en el acuífero o salir de el a través de este borde.

La recarga principal al acuífero proviene de la precipitación. El agua se incorporará al sistema por la infiltración de la precipitación y será distribuida a través del área del

Watershed	Measured Baseflow (m ³ /s) 2004 - 2006	Calculated Baseflow (m ³ /s)
Yukyry	1 - 1.25	1.26
Guazu	0.35 - 0.44	0.33
Ytororo	0.1 - 0.13	0.14
Ytay	0.6 - 0.75	0.63
Ita	0.35 - 0.44	0.6
Yaguaron	0.25 - 0.31	0.57
Total	3.0 - 3.9	3.5

Table 4.1 Tabla de calibración usando valores medidos y calculados de caudales de base

Los resultados de calibración arriba fueron considerados satisfactorios considerando la proximidad de los valores calculado a los valores medidos en las cuencas principales y los volúmenes totales del caudal base a través del modelo. La limitación principal es que los caudales medidos representan solamente dos años de datos; sin embargo, esto podía constituir el punto de partida para los refinamientos en el futuro.

Una vez el modelo calibrado, los valores de cargas calculados vs. los valores medidos fueron analizados (Figura 4.7). Desempejante de los modelos de escala más pequeña donde las informaciones requeridas están más disponibles, esta figura no es una medida completamente exacta de la calibración. Sin embargo, todas las tentativas fueron hechas para reducir el error (NRMSE) cuando fue posible. La Figura 4.7 demuestra que los resultados calculados y medidos son generalmente cerca de la línea deseada (azul) o dentro del intervalo de confianza de 95%. El error (NRMSE) era de 15.2%, que se consideró satisfactorio para el modelo de escala regional.

Cuenca	Conductancia de Ríos (m ² /d)
Yukyry	3.0 E6
Guazu	9.2 E6
Ytororo	9.7 E6
Ytay	1.1 E7
Ita	5.5 E4
Yaguaron	4.6 E3
Remaining	5.1 E3

Tabla 4.2 Conductancias de los ríos en las cuencas principales del modelo

4.5 Modelo Hidrodinámico

Esta sección trata la modelación matemática de flujo. Ejemplos de resultados en esta sección incluyen valores de abastecimiento, dirección de flujo y niveles de agua en el acuífero. Tres escenarios fueron considerados:

- Las condiciones de 2005 o las condiciones presentes
- Las condiciones de 2035 o de condiciones futuras
- Las condiciones de 1976 o de sequía

Como fue indicado anteriormente, una limitación durante la calibración era la ausencia de datos sobre los pozos privados. Datos que faltan incluyen informaciones sobre la distribución espacial de los pozos y sus propiedades. Por lo tanto la interpretación de algunos resultados deberían recordar estas ausencias. Estas conclusiones serán presentadas en más detalles en esta sección.

4.5.1 Escenario 1 - Condiciones de 2005

En el primer escenario, el modelo calibrado fue corrido bajo condiciones de consumo actual de agua subterránea. De acuerdo con el registro de datos compilados, 139 pozos dentro del dominio del modelo y que contenían los datos hidrogeológicos o de la construcción requeridos fueron entrados. El consumo total de los pozos del público a través del área del estudio (1172 km²) alcanzó 17 milímetros. La recarga a través del dominio modelo fue basada en la ecuación general siguiente del balance del agua:

$$Q_{in} = Q_{out} \pm \Delta S \quad [1]$$

Donde

Q_{in} es el flujo neto entrando al sistema (después de la consideración del evapotranspiración)

Q_{out} es el flujo neto saliendo del sistema

ΔS es el cambio de almacenamiento en el sistema

En el caso de un régimen de flujo constante, ΔS se considera igual a cero.

Q_{in} = Recarga + Flujo entre cuencas

Q_{out} = Caudal de Base + Descarga de pozos + Flujo entre cuencas

Substituyendo los artículos por sus términos apropiados en la ecuación [1]:

$$\text{Recarga} = \text{Caudal de Base} + \text{Descarga de pozos} \quad [2]$$

En general, el término de descarga de pozos debería referir a ambos tipos de pozos: privados y públicos. Sin embargo en la ausencia de datos sobre los pozos privados, esos no pudieron ser incluidos en el sistema bajo del escenario de base. Fue considerado que los pozos privados son incorporados indirectamente dentro de las mediciones de caudal de base porque el caudal de arroyos será afectado por el bombeo de pozos vecinos. La ecuación [2] deviene:

$$\text{Recarga} = \text{Caudal de base} + \text{Descarga de pozos públicos} \quad [3]$$

La recarga a través del dominio del modelo fue basado sobre la ecuación [3] donde las mediciones de caudales de base estaban disponibles. Esto fue el caso de las cuencas: Yuquyry, Guazu, Ytororo, Ytay, Itá, Yaguarón y Lambaré. Los valores de caudales de base fueron convertidos desde m³/s hasta mm/año dividiendo el caudal de base por la superficie de la cuenca respectiva y después haciendo las conversiones de unidades necesarias.

Fuera de estas áreas, la recarga fue estimada basado en los valores del informe de hidrología (Báez Benítez y Monte Domecq, 2007). Báez y Monte calcularon la infiltración de la precipitación en el área de Asunción a 148 Hm³/año o 126 milímetros cuando el promedio se calcula sobre el área superficial del acuífero (1172 km²). Esto corresponde aproximadamente a 9% de la precipitación (1388 milímetros). Según los mismos autores, los valores de la precipitación fueron encontrados con una variación entre 1400 milímetros en el área de Asunción (oeste) y 1600 milímetros en el extremo este del acuífero. Por lo tanto, un valor medio de la precipitación de 1500 milímetros fue adoptado para las áreas fuera de las 7 cuencas arriba mencionadas. La aproximación fue considerada aceptable puesto que las áreas afectadas se dispersan alrededor del acuífero y sus superficie acumulativa no excede del 35% del dominio total. La recarga en estas áreas fue tomada para ser el 9% de la precipitación (135 milímetros) a los cuales fue agregado la descarga de pozos de bombeo (17 milímetros).

Los valores de la entrada de la recarga fueron acumulados en la tabla siguiente:

Cuenca	Recarga (mm)
Yuquyry	147
Guazu	326
Ytororo	261
Ytay	158
Itá	168
Yaguarón	180
Lambaré	314
Otras áreas	152

Tabla 4.3 Valores de recarga en las cuencas del acuífero

Los resultados del escenario 1 muestran el abastecimiento a través del área del estudio debido al bombeo de los pozos públicos registrados (Figuras 4.8 y 4.9). Los cálculos fueron hechos comparando los valores del drawdown entre la condición sin bombeo y la condición donde los pozos de bombeo fueron activados. La Figura 4.9 muestra los abastecimientos más altos en las periferias del modelo que alcanza hasta los 10m. Sin embargo, debe ser observado que los valores calculados en este escenario tienen una escala regional y no representan necesariamente condiciones locales del sitio. Los drawdowns de la vida real pueden ser más altos que ése dependiendo de las condiciones locales del bombeo y de litología alrededor de los pozos.

La dirección general del flujo era la misma que la indicada por los niveles del agua medidos. Esto significa que la condición de borde de carga constante impuesta sobre el límite con el Río Paraguay se comportaba como borde de salida del agua. Los análisis de la sensibilidad fueron realizados para probar el efecto de la condición de borde en el dominio del flujo. El valor de carga constante fue levantado a 62 m que es la carga observada en los pozos de observación en la región. Sin embargo, incluso esta alta carga, el límite todavía actuaba como borde de salida del sistema. Esto indica que el comportamiento de la condición de borde con el Río Paraguay y con el agua subterránea del EL Chaco es función de las condiciones de bombeo (no conocidos) cerca del límite. Esto significa también que en sus actuales localizaciones, los pozos públicos no plantean ningún riesgo de la intrusión del agua salada en su actual índice del bombeo al Acuífero Patiño. El resultado valida la opción de estas localizaciones como sitios de pozos de bombeo puesto que no plantean una tensión sobre el sistema del límite y por lo tanto no contribuyen al problema de la intrusión del agua salada.

4.5.2 Escenario 2 – Condiciones de 2035

El segundo escenario consideró el efecto del bombeo creciente del acuífero en respuesta a demandas de aumento del agua y manteniendo la condiciones actuales de recarga. El consumo proyectado de agua subterránea en 2035 fue basado según el estudio de hidrología (Báez Benítez y Monte Domecq, 2007). El estudio proyectó un índice de bombeo de aproximadamente 296 Hm³/año (252m m) a través del acuífero. Esto asciende a doblar las condiciones de bombeo existentes por el año 2035.

Para simular las condiciones propuestas, la descarga de bombeo proyectada fue distribuida entre los pozos existentes proporcionalmente a las capacidades de bombeo de los pozos. Por ejemplo, si un pozo está bombeando actualmente 5% del volumen de bombeo total, él será asignado un porcentaje de bombeo de 5% con respecto a los 252 milímetros proyectados. El valor de bombeo exacto de la tarifa atribuido a cada uno de los pozos se incluye adentro el Anexo 7.2.

La distribución proporcional de descargas proyectadas entre pozos existentes se puede defender por el hecho de que los pozos productivos están situados generalmente en las zonas más productivas del acuífero. Con el nivel de desarrollo actual del Acuífero Patiño, es lógico asumir que los sectores más productivos del acuífero serán más explotados. Por lo tanto, en ausencia del planeamiento específico para perforaciones futuras, es una buena estimación sugerir que las explotaciones de agua futura serán situadas en las zonas más productivas del acuífero.

El escenario de 2035 basado en las necesidades proyectadas utilizó el mismo modelo calibrado y presentado en las secciones anteriores. En efecto, la conductividad hidráulica de las formaciones geológicas, las condiciones de borde y las conductancias de ríos fueron mantenidas. Esto constituye la base de las predicciones numéricas donde las características del modelo básico se mantienen igual como calibrado y el escenario futuro será corrido cambiando solamente las condiciones de operación.

Cuando el escenario de 2035 fue corrido con un bombeo de 252 milímetros, el modelo no pudo converger. Varios simuladores fueron elegidos con diferentes criterios de solución (número de iteraciones, de criterios de convergencia...) y fueron probados para cerciorarse de que esto no era debido a los errores numéricos/de computación. La carencia de la convergencia fue causada por el desequilibrio fuerte entre la recarga y la descarga proyectada de los pozos. Esto significa que el crecimiento previsto en la demanda 2035 no se puede sostener por el agua subterránea del Acuífero Patiño únicamente.

Las proyecciones de bombeo fueron bajadas progresivamente hasta la convergencia del modelo. Esta fue lograda cuando los niveles de bombeo estaban aproximadamente 150 mm/año. Esto representa un volumen considerablemente más bajo que la necesidad estimada para 2035. Según las proyecciones de Báez y de Monte (2007, página 70), esta necesidad de bombeo estaría más cercano a las proyecciones para el año 2015 bajo condiciones de media precipitación. Es decir que en el caso de cambio en niveles de precipitación como debido al fenómeno EL Niño, las estimaciones del tiempo podrían cambiar.

Para comparar el efecto del aumento en el bombeo sobre los niveles del agua en el acuífero, el abastecimiento fue calculado usando los valores de carga de 2005 como condiciones iniciales. La Figura 4.10 demuestra los valores del abastecimiento a través del área del estudio como condiciones de base, la situación de 2005. La figura demuestra que los drawdowns adicionales pueden alcanzar hasta 40 m. Esto podría significar que algunos pozos de baja profundidad podrían secarse; lo que puede dar lugar a situaciones problemáticas cuando no hay otra fuente de agua potable.

En el escenario antedicho, la condición de borde a carga constante continuó su comportamiento como borde de salida. Esto indica que incluso condiciones de alto bombeo, los pozos de producción (públicos) existentes no tienen riesgo a la intrusión del agua salada. Sin embargo, con la existencia de pozos privado y de otro pozos no conocidos cerca del límite con el EL Chaco, la calidad del agua puede deteriorar más en el futuro, especialmente si el crecimiento en el consumo por pozos privados sigue como el crecimiento de uso por pozos públicos.

4.5.3 Escenario 3 – 1976 Condiciones de Sequía

El escenario actual fue dirigido originalmente al estudio de la viabilidad del bombeo futuro (2035) bajo condiciones de sequía. Sin embargo, con el escenario anterior (escenario 2) dando por resultado recursos escasos incluso bajo condiciones de precipitación normal, la premisa del escenario 3 fue cambiada. Por lo tanto, el escenario actual tiene como objetivo el determinar el efecto de la sequía en general sobre el sistema.

El escenario 3 fue corrido usando las condiciones de bombeo existentes (2005) y solicitando condiciones extremas de precipitación tal como presentado por Báez y Monte (2007) en el año 1976. Una condición de límite de la recarga de 80 milímetros fue aplicada uniformemente a través del dominio del modelo. La Figura 4.11 demuestra una sección representativa a través del centro del dominio con la dirección del flujo y la profundidad a la tabla del agua. El primer resultado encontrado es que la misma dirección general del flujo fue mantenida en este escenario. En efecto, a pesar de la reducción de la recarga, el sistema todavía descargaba a la condición de borde apenas como en los escenarios anteriores. Esto significa que la dirección de flujos locales todavía fue dominada por los efectos de pozos vecinos.

El nivel de agua bajó a través de la sección. Una comparación directa con el escenario de base (2005) donde las condiciones de recarga fueron aplicadas de manera heterogénea dependiendo del valor de infiltración en cada cuenca no puede ser justificada. Sin embargo, el descenso en el nivel de agua en el escenario 3 era cerca de 50% más pronunciado que el escenario 1. Otras consecuencias se relacionaron con el transporte y serán tratadas en la Sección 4.6.

4.6 Modelo de Transporte Advectivo

La modelación de transporte requiere un monitoreo continuo de los niveles de concentración en los pozos de observación tanto como las mediciones continuas de cargas hidráulicas son necesarias para la calibración del modelo del flujo. A menos

que los solutos tengan un comportamiento similar en el medio acuoso, la supervisión tiene que ser específica para cada parámetro de la preocupación. Los datos de concentración se incorporan normalmente en un modelo durante un momento especificado y las concentraciones calculadas se comparan a los niveles medidos en un paso más último del tiempo. Ésta es la base de la calibración del modelo de transporte donde características de la ecuación del transporte (dispersividad, el coeficiente de retraso,...) se modifican para lograr el acuerdo entre los valores calculados y medidos. En algunas ocasiones, el modelo del flujo necesita ser recalibrado si el modelo del transporte no puede calibrar. Generalmente cuanto más largo es el expediente histórico, más exacta será la calibración del transporte.

Las concentraciones históricas continuas no están disponibles en el acuífero de Patiño. En lugar, medidas aislada de la calidad del agua se ha conducido en puntos determinados en los años 2000, 2001 y 2006. Los expedientes se limitan sobre todo a una medida por el sitio que corresponde al análisis hecho cuando el pozo fue perforado. Consecuentemente, un acercamiento más comprensivo hacia la modelación de transporte fue tomado en el actual estudio. Éste fue considerar la delineación de la zona de la captura usando el transporte advectivo y el “particle tracking”.

4.6.1 Delineación de zonas de captura con el “particle tracking”

La delineación de las zonas de la captura en este estudio fue realizada con dos objetivos principales:

- Delinear las zonas de captura de 10, 20 y 30 años en los pozos públicos
- Sobreponer las zonas de la captura sobre el mapa de la vulnerabilidad para definir mejor las áreas principales de protección de pozos (WHPA)

Al aplicar a un modelo de agua subterránea, diversas combinaciones de parámetros pueden dar lugar a una variación considerable del tamaño y forma de la zona de captura de los mismos pozos de bombeo. Por ejemplo, las zonas de captura simuladas bajo condiciones de los caudales bajos de recarga, de alta conductividad hidráulica y de porosidad baja darían lugar normalmente a grandes zonas de captura. Inverso, la alta recarga, las conductividades hidráulicas bajas y el alto valor de la porosidad darían lugar a zonas más pequeñas de captura. Cuál es más problemático es que ambos escenarios podrían en teoría proporcionar un modelo calibrado.

La Autoridad Nacional de Ríos (NRA) en el Reino Unido ha enumerado (1995) los factores principales siguientes como fuentes potenciales de incertidumbre en la determinación de zonas de captura:

- La incertidumbre de medidas en puntos (point measurement) por ejemplo en las estimaciones de la conductividad hidráulica en las localizaciones específicas con pruebas de bombeo o slug (ocurrencia común especialmente cuando las medidas del punto no están disponibles)
- La incertidumbre en la aplicabilidad de las medidas en puntos a áreas más grandes debido a la diferencia de escalas
- Incertidumbre en la distribución de los parámetros del modelo
- Errores debidos a las deficiencias de los modelos conceptuales
- Limitaciones de un modelo elegido para representar un sistema del acuífero

En un intento de incluir una gama de condiciones extremas, un análisis de la sensibilidad fue conducido aplicando 2 valores de la porosidad: el 3% y el 15%. El primer valor de porosidad explicará el flujo dentro del sistema secundario (porosidad de la fractura) mientras que el valor del 15% explicará flujo dominado por la matriz. El tamaño de las áreas de captura de pozos será diferente dependiendo de la porosidad; las zonas de la captura es inversamente proporcional a la porosidad. Adoptar el área apropiada de la protección será una decisión para la agencia reguladora que sabe que la zona del 3% dará un resultado más conservador cubriendo un área más grande.

El particle tracking para este modelo fue calculado como el tiempo por advección desde el nivel de agua al pozo. Esto fue hecho poniendo las partículas para el dominio en el modelo entero en el centro de cada celda del modelo. La elevación de estas partículas era igual a la elevación de la tabla del agua en cada localización. Una operación similar se podría hacer manualmente en cada fila o columna en MODFLOW utilizando la opción “add particle”. El particle tracking fue corrido en el paquete MODPATH dentro de MODFLOW.

Los resultados de la operación fueron exportados en ArcGIS para trazar. Las partículas extraídas representan las localizaciones en donde las moléculas de agua (partículas) fueron interceptadas por un pozo. Otras partículas que no fueron interceptadas por ningún pozo fueron desechadas. Este procedimiento fue utilizado para generar áreas de protección de pozos o (WHPAs) para diversa serie de tiempo 10, 20, y 30 años.

En los WHPA de 10 años, todas las partículas con una duración de recorrido menos o igual a 10 años son trazadas en el mapa. Estas zonas tienen una resolución de 500m. La Figura (4.12) demuestra la delineación de WHPAs a través del área del estudio para las condiciones de 2005 usando un valor de porosidad de la matriz de 15%. Para los WHPAs de 20 años, todas las partículas con una duración de recorrido entre 10 y 20 años (incluidos), fueron trazadas usando la misma resolución de 500 metros. Los WHPAs de 30 años incluyeron partículas con una duración de recorrido entre 20 y 30 años. La última categoría de WHPAs fue trazada para todas las partículas con una duración de recorrido que excedía 30 años (Figura 4.12).

Las áreas de WHPAs calculadas demuestran las zonas de 0-30 años como más o menos contenidas. De una parte, esto podría significar que el límite de la zona de protección de 30 años podría ser bastante localizado. Por otra parte, si las fuentes de contaminación ya son existentes en las áreas delineadas, no tomará mucho tiempo para el contaminante sea interceptado por el pozo. Las áreas con tiempo de recorrido > 30 son comprensiblemente más grandes y podrían ser utilizadas como ayuda al planeamiento de más largo plazo del acuífero.

WHPAs traslapados anteriormente con el mapa de vulnerabilidad pueden ayudar en la categorización más avanzada de las zonas de prioridad en el área. Las áreas ya altamente vulnerables del acuífero pueden ser incluidas en un sistema de protección más elaborado. Esto podría ayudar a fijar las prioridades para dividir las diversas áreas en zonas. Por ejemplo, un WHPA en un área altamente vulnerable debe en teoría conseguir una protección más alta sobre un WHPA en área con una vulnerabilidad media.

El mismo procedimiento usado para generar WHPAs fue repetido con un valor de porosidad de 3%. Esto fue hecho para explicar el efecto de la porosidad secundaria tal como fracturas, y fallas sobre el flujo. Este acercamiento se puede considerar una representación más conservadora de WHPAs que esta basado en porosidad primaria.

Para determinar el efecto del bombeo sobre la intrusión del agua salada a través del área del estudio, los WHPAs con porosidades de 15 y del 3% fueron traslapados con el frente del agua salada (Figuras 4.20 y 4.21). Los pozos en y alrededor del área de Asunción parecen ser los más vulnerables. El actual método para determinar riesgos de la salinidad se basa en una estimación estática del frente de la salinidad. Fue basado sobre medidas instantáneas y aisladas de las concentraciones de cloruro. Sin embargo, de naturaleza, la intrusión del agua salada es un proceso dinámico; se espera que se desarrolle en función del bombeo a través del acuífero. Por lo tanto, el análisis de la intersección con el frente salino fue limitado a las WHPAs bajo condiciones 2005, que estaban las más cercanas a las fechas de las mediciones. Es decir trazar el WHPAs basado en las condiciones 2035 no será justificado porque el frente del agua salada se habrá movido y los datos actuales no permiten predicciones exactas de este movimiento.

un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua. Cuando los datos de concentraciones continuas estén disponibles, será posible modelar el transporte temporal de solutos en el acuífero. Finalmente, una caracterización más detallada del borde noroeste con el Río Paraguay sería beneficiosa para la conceptualización del avance del agua salada. En efecto, el frente parece ser bastante heterogéneo y una caracterización más detallada de los parámetros implicados mejoraría predicciones a largo plazo.

SIMULACION MATEMATICA

6.0 Referencias

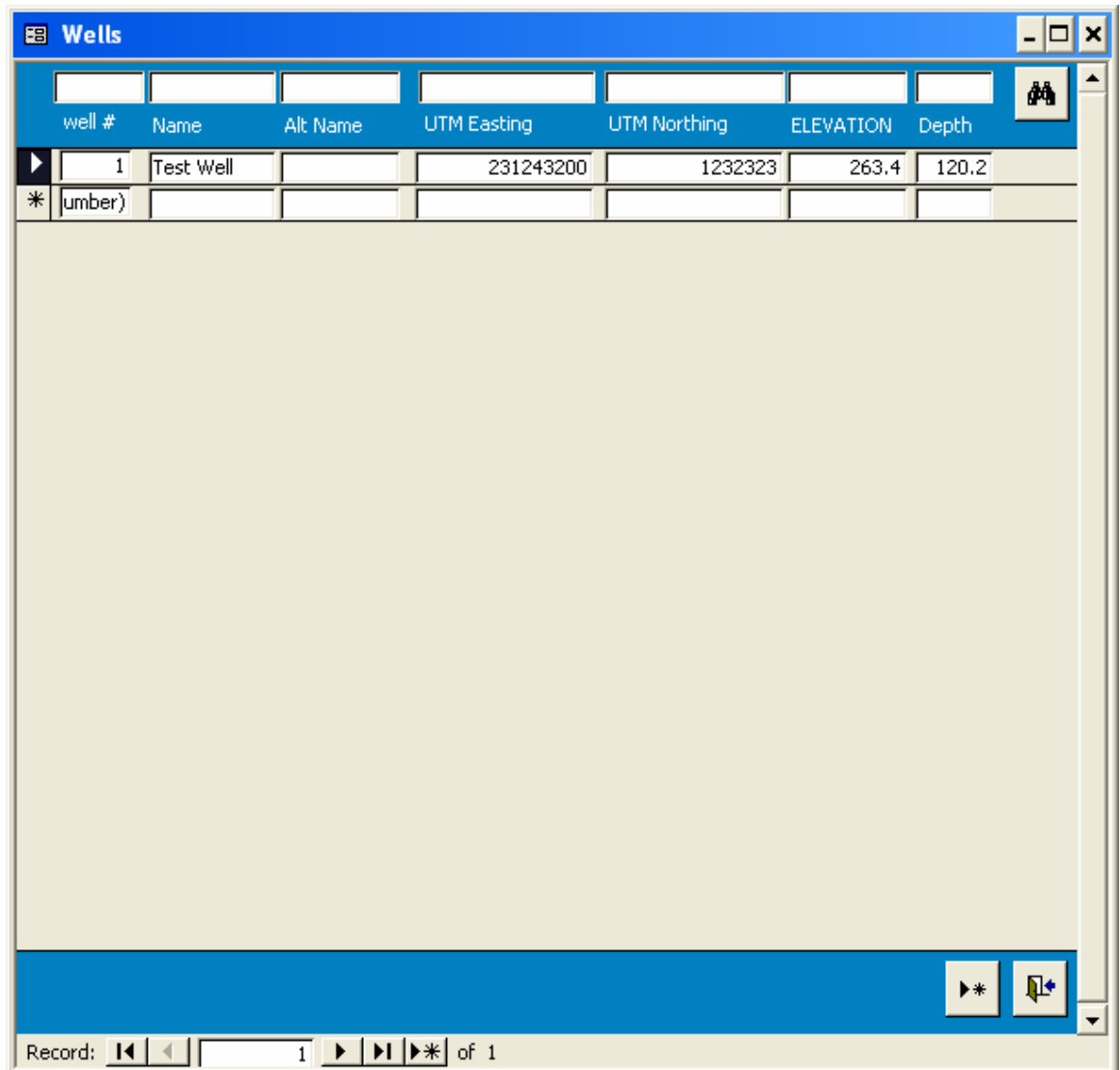
- Baez Benitez, J. and Monte Domecq, R., 2007. Investigación para la elaboración del Balance Hídrico Integrado del Acuífero Patiño. Informe final para Hidrocontrol S.A.
- Báez Benitez, J. and Monte Domecq, R., Variación Espacial de los Excesos y Déficit Hídricos en el Paraguay (unpublished report).
- Báez Benitez, J. and Monte Domecq, R., 2006 Informe Técnico 2.11 Balance Hídrico del acuífero Patiño
- Barros, V., Chamoro, L., Coronel, G., and Baez Benitez, J., 2004. The major Discharge Events in the Paraguay River: Magnitudes, Sources Regions and Climate Forcings. Journal of Hydrometeorology, volume 5, American Meteorological Society.
- Figueredo C.A., 2006 Informe Técnico 2.2 Geología Área del Acuífero Patiño
- Foster S., Hirata, R. Gomes, D., D’Elia, M., Paris, M., 2002. Protección de la Calidad del Agua Subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales, Banco Mundial, Washington, D.C.
- Jerozolinski, T., 2007. Informe Etapa I and Plan de Gestión Estudio de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción-Paraguay (Acuífero Patiño).
- National River Authority (1995). Modeling Groundwater Source Catchments in the UK: Implementation and Review of a Qualitative Method for Representing Uncertainty.
- Sekita K, Wehrle A, 2006 Informe Técnico 2.4 Investigación geofísica – Sondeos Eléctricos Verticales
- Van der Linden, W., 2001. Desarrollo del Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos- Informe técnico 1.1- SENASA
- Wehrle A, 2006, Informe Técnico 2.3 Inventario de pozos
- Wehrle A, 2006, Informe Técnico 2.6 Perforación pozos piezómetros
- Wehrle A, Sekita K. ,2006. Informe Técnico 2.8 Ensayos de Bombeo

7.0 ANNEXOS

7.1 PWIS (Paraguay well information system)


Abrir el Archivo: pwis_GUI.mdb

La primera página aparecerá como sigue:



Se puede ajustar las dimensiones de la página pulsando sobre el cuadro de la esquina derecha superior.

Pulse sobre el botón  debajo de la página para crear un registro nuevo de pozos.

Para acceder un registro existente doble pulse el símbolo de selección del registro  ubicado en el margen izquierdo de la lista de pozos “WELLS” como indicado arriba.

Un registro Nuevo parecerá como indicado abajo:

Empiece la entrega de información en las cajas apropiadas del cabezal de cada registro (Name, UTM Easting,...) y después entregue los detalles de construcción en las opciones diferentes (Casing, Screen, ...). La explicación de las categorías de información es como sigue:

ID: número automático generado por PWIS según el orden de entrega del registro

Name, official code: nombre o número oficial del pozo según los archivos existentes

Los coordinados del sitio se pueden cargar como UTM o como coordinados geográficos

Easting: longitud

Northing: Latitud

Comments: comentarios

Elevation (masl): elevación en metros sobre el nivel del mar (msnm)

TOC: elevación de la tubería del pozo sobre el nivel del mar (msnm). Si la información no está disponible, indique la altitud de la tubería sobre el suelo e incluye la nota en los comentarios.

Depth (m below GS): profundidad en metros debajo de la superficie del suelo

Use: uso del pozo, elija un tipo de uso de la lista disponible (Municipal, industrial, domestico,...)

Una vez el cabezal del pozo completado con la información disponible, entregue la información bajo las categorías disponibles:

Casing: entubamiento

Screen: filtro

Lithology: Litología

Water Levels: niveles de agua

Flow: Descarga

Water quality: Calidad del agua

Pumptest: Ensayo de bombeo

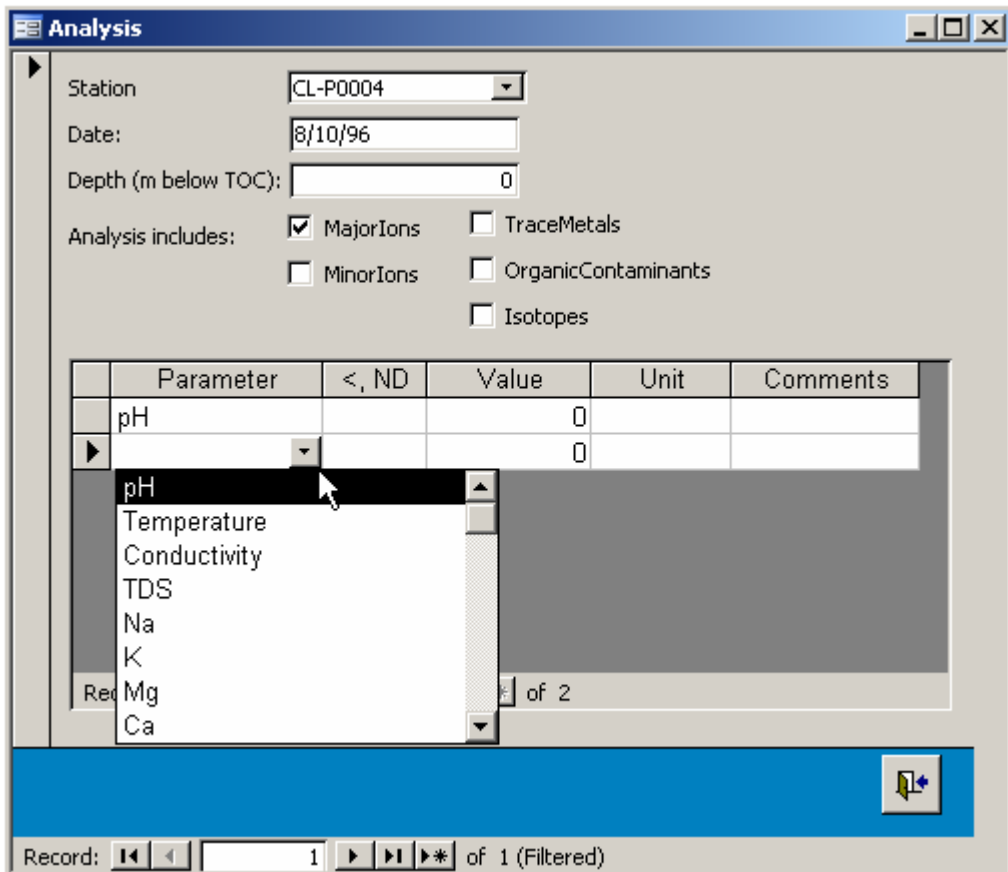
Documents: documentos, archivos


Empiece la entrega de información de la izquierda a la derecha.


Algunas informaciones se entran a la mano, otras se pueden elegir dentro de una lista de opciones disponibles. Si una información se entrega (a la mano) donde se necesita elegir una opción desde una lista, un mensaje “error” aparecerá. En este caso puede reemplazar la información o si necesita salir de la ventana pulse “Esc” en el teclado.

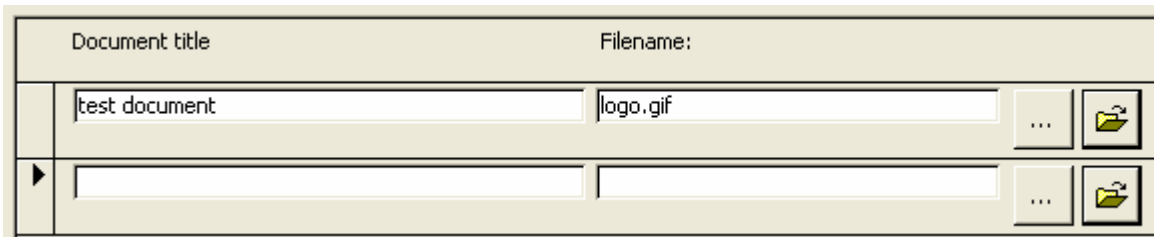
En las opciones “Casing”, “Screen”, y “Lithology”, la entrada de profundidad se hace debajo de las columnas “**from**”: desde y “**to**”: hasta. Afín de automatizar la entrega de profundidades, y evitar un boquete en la secuencia de profundidades, entregue la información a la mano en la primera fila. En la segunda fila, pulse sobre el botón “*” en la margina izquierda y la información de profundidad será actualizada (la columna “**from**” tomara el mismo valor de la columna “**to**” de la fila anterior).


Debajo de la categoría “water quality data”, hay varias opciones disponibles (Major Ions, Minor Ions,...) Iones Mayores, Iones Menores,... Para entregar datos debajo de cada opción, pulse sobre el cuadro respectivo (una marca parecerá en el cuadro). Doble pulse sobre el título de la columna y una ventana “**Analysis**” parecerá (figura abajo). Debajo de la columna “**Parameter**” una lista de parámetros químicos está disponible. Elija los parámetros requeridos y entregue los valores de concentraciones.

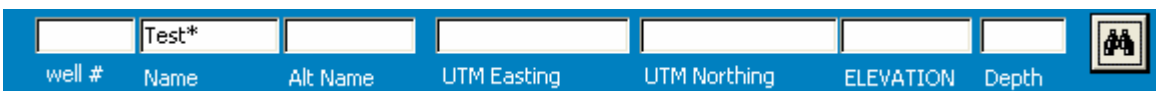


Todos los archivos originales de pozos digitalizados (scan) deberán ser cargados en una carpeta llamada “docs”. La carpeta “docs” será ubicada en la misma carpeta que la base de datos PWIS. En la categoría “**Documents**” pulse el botón  afín de asignar una vincula al archivo digitalizado.

Para abrir el archivo vinculado y chequear lo, pulse el botón  como indicado abajo:



Finalmente, para correr búsquedas en la base de datos, puede regresar a la página inicial y entrar una (o varias) categoría como el ejemplo de la figura abajo y pulse el botón 



Búsquedas del tipo “wildcard” (con *) son permitidas.

