

**Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de  
las Formaciones Tacuarembó – Arapey del  
Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay**

Por

**Andrea Alejandra Gómez**

Directora: **Dra. Leticia Rodríguez**

Co-Director: **Dr. Luis S. Vives**

Tesis remitida al Comité Académico de Maestría de la

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS**

Como parte de los requisitos para la obtención del grado de

**Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos**

de la

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**

**2007**

## **DECLARACIÓN DEL AUTOR**

Esta disertación ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté disponible a sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta disertación son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para la citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán concebidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

FIRMA: .....

## **Dedicatoria**

A mi familia: Nonos, Mami, Papi, Lore, Santi y Néstor.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sustentable del Sistema Acuífero Guaraní que financió el proyecto del Fondo de Universidades, marco de la presente tesis.

A todos los integrantes del grupo de trabajo del Proyecto del Fondo de Universidades denominado “Desarrollo metodológico para la evaluación de la recarga y vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), en Argentina y Uruguay”, del cual formé parte y con quienes aprendí muchísimas cosas de las que hoy se plasman en la tesis. Ellos son: Dr. Adrián Silva Busso, Lic. Nicolás Seoane, Lic. Gabriela Roullier, Ing. Fernando Pacheco, Ing. Alejandro Oleaga, Dr. Luis Vives, Dra. Leticia Rodríguez.

A la Universidad Nacional del Litoral, y en especial al Centro de Estudios Hidroambientales (CENEHA), por brindarme el lugar de trabajo.

A los integrantes del proyecto del Fondo de Universidades denominado “Vulnerabilidad y Riesgo hidrogeológico del SAG en el área aflorante de Rivera, Uruguay” por la valiosa información brindada para la calibración del modelo numérico.

Al Lic. Luis Pertovt por su ayuda en la confección del modelo digital del terreno y por su colaboración en la búsqueda de los datos meteorológicos.

Al Dr. Raúl Rivas por su ayuda en el tratamiento de imágenes satelitales y, también, por su colaboración en la búsqueda de los datos meteorológicos.

Al Ing. Carlos Scioli por su colaboración en la confección del modelo digital del terreno en la interfase GMS.

Al Dr. Norberto García por facilitarme desinteresadamente los datos meteorológicos de la base de datos CRU (Climatic Research Unit).

Un agradecimiento muy especial a mi directora, la Dra. Leticia Rodríguez, quien con su incansable capacidad de trabajo me dio las fuerzas necesarias para que esta tesis se concrete.

Y por último, pero no menos especial, mi agradecimiento a mi co-director, el Dr. Luis Vives, quien junto a Leticia, me enseñaron cosas admirables, tanto desde el punto de vista técnico como humano.

**Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las Formaciones  
Tacuarembó – Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de  
Uruguay**

**INDICE GENERAL**

<b>Índice</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>Capítulo 1: Introducción</b>	
1.1 Marco de la tesis .....	1
1.2 Consideraciones generales .....	1
1.3 Consideraciones particulares del SAG .....	5
1.4 Descripción preliminar del SAG .....	7
1.5 Motivación y objetivos .....	9
1.6 Contenido de la tesis .....	10
<b>Capítulo 2: Descripción del área de estudio</b>	
2.1 Ubicación .....	12
2.2 Clima .....	15
2.3 Geología .....	17
2.4 Geomorfología .....	23
2.5 Hidrografía .....	24
<b>Capítulo 3: Análisis Hidrogeológico</b>	
3.1 Antecedentes regionales y locales .....	27
3.2 Información básica disponible .....	29
3.3 Litología y profundidad de las perforaciones .....	31
3.4 Mapas piezométricos .....	35
3.5 Niveles y direcciones de flujo .....	43
3.6 Explotación del SAG. Caudales de bombeo y específicos .....	45
3.7 Parámetros hidráulicos. Análisis de ensayos de bombeo .....	47
3.8 Hidrogeoquímica .....	51

## **Capítulo 4: Estimación de la recarga**

4.1 Antecedentes de estimaciones en la zona .....	54
4.2 Revisión de metodologías de estimación de la recarga .....	55
4.3 Datos disponibles .....	60
4.4 Balance hídrico .....	64
4.4.1 Aplicación de Easy-Bal .....	65
4.4.2 Análisis de Sensibilidad .....	70

## **Capítulo 5: Modelo hidrogeológico conceptual**

5.1 Modelo regional de la cuenca norte de Uruguay .....	74
5.2 Modelo local: Rivera-Santana do Livramento .....	78

## **Capítulo 6: Modelo Numérico**

6.1 Antecedentes en modelación del SAG .....	84
6.2 Código numérico .....	87
6.2.1 Modelo matemático .....	87
6.2.2 Características generales de MODFLOW y GMS .....	88
6.3 Implementación del modelo .....	90
6.3.1 Área modelada .....	91
6.3.2 Generación del modelo digital del terreno .....	92
6.3.3 Generación del sólido .....	93
6.3.4 Discretización espacial .....	96
6.3.5 Condiciones de contorno de carga hidráulica prescrita y flujo prescrito .....	99
6.3.6 Condiciones de contorno de ríos .....	101
6.3.7 Recarga / Evapotranspiración .....	103
6.3.8 Bombeo .....	104
6.4 Estrategia de Calibración .....	109
6.5 Resultados	
6.5.1 Propiedades hidrogeológicas .....	110
6.5.2 Piezometría calculada .....	111
6.5.3 Vectores de flujo .....	120
6.5.4 Flujos y balance de masa .....	122

6.6 Análisis de sensibilidad .....	126
6.7 Explotación del modelo .....	130
<b>Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>133</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>141</b>
<b>Anexos</b>	

## **Lista de Figuras**

1.1	Mapa esquemático del Sistema Acuífero Guaraní	2
1.2	Esquema de flujos en un sistema transfronterizo	3
2.1	Mapa geológico simplificado de la Cuenca Chaco-Paranaense en Uruguay, incluyendo principales fallas del área y posibles zonas para áreas piloto de investigación	13
2.2	Ubicación del área de estudio en el entorno del SAG	14
2.3	Precipitación media anual en Uruguay. Fuente, DNM, 2006	16
2.4	Temperatura media anual en Uruguay. Fuente, DNM, 2006	16
2.5	Comparación de perfiles estratigráficos en Uruguay (a: Santana, 1994) y Brasil (b: Chang, 1997)	18
2.6	Roseta de lineamientos presentando la frecuencia de los lineamientos identificados a partir de sensores remotos (Rodríguez et al., 2006)	20
2.7	Histograma de longitud (eje horizontal: longitud de lineamientos; eje vertical: número de lineamientos) (Rodríguez et al., 2006)	20
2.8	Lineamientos en la zona de afloramiento de basalto en las cercanías la localidad de Rivera (Rodríguez et al., 2006)	21
2.9	Mapa geológico de la ciudad de Rivera y sus alrededores (Rodríguez et al., 2006)	22
2.1	Formación Arapey en el área de estudio, lineamientos y fallamientos	23
2.11	Red hidrográfica de la zona de estudio	25
3.1	Histograma de frecuencia de profundidades de las perforaciones en el sector brasileño	32
3.2	Histograma de frecuencia de profundidades de las perforaciones en el sector uruguayo	33
3.3	a) Ubicación en planta de las perforaciones consideradas junto a un Mapa esquemático en perspectiva con los perfiles litológicos de las perforaciones	34
3.4	Detalle por zonas de la ubicación en planta de las perforaciones consideradas en el estudio, principalmente en el entorno a la planta urbana donde se encuentra la mayor densidad	35
3.5	Piezometría regional años 2000 – 2001 de Oleaga (2002a)	36
3.6	Piezometría del área de Rivera en el año 2002 realizada por OSE (Perez y Rocha, 2002)	36
3.7	Información de niveles piezométricos actualizada. a) noviembre 2004 (Pacheco, 2004); b) agosto 2005 (Rodríguez et al., 2006); c) diciembre 2005 (Rodríguez et al., 2006) y d) Collazo (2005)	40
3.8	a) Datos piezométricos completos. b) Datos piezométricos correspondientes al nivel acuífero profundo	41
3.9	Piezometría del acuífero somero en diciembre 2005 (Rodríguez et al., 2006)	42
3.1	Piezometría del acuífero profundo en diciembre 2005 (Rodríguez et al., 2006)	43
3.11	Explotación para la ciudad de Rivera	46
3.12	Explotación para la ciudad de Santana do Livramento	47
3.13	Conductividad hidráulica (en m/d)	49
3.14	Concentraciones de Na vs. Cl	52
3.15	Relación entre especies medidas en campo, pH vs. Conductividad	53
4.1	Comparación de los datos de precipitación mensual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1914 - 1997	61
4.2	Comparación de los datos de precipitación anual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1914 – 1997	62



4.3	Comparación de los datos de precipitación mensual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1967-1997	62
4.4	Comparación de los datos de precipitación anual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1967-1997	63
4.5	Comparación de los datos de temperatura promedio mensual entre la serie de datos puntuales y de grilla, período 1960 – 1999	64
4.6	Evolución de la recarga anual respecto de las precipitaciones. Serie de datos puntuales, período 1960 – 1997	66
4.7	Evolución de la recarga mensual respecto de las precipitaciones. Serie de datos puntuales, período 1960 – 1997	67
4.8	Evolución de la recarga anual respecto de las precipitaciones. Serie de datos de grilla, período 1901 – 2002	68
4.9	Evolución de la recarga mensual respecto de las precipitaciones. Serie de datos de grilla, período 1901 – 2002	68
4.10	Comparación de tasas de recarga anuales estimadas a partir de las series de datos puntuales y de grilla	69
4.11	Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto del Valor de Laminación. Serie de datos puntuales, período 1960 – 1997	71
4.12	Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto de la reserva útil del suelo. Serie de datos puntuales, período 1960 – 1997	72
4.13	Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto del Valor de Laminación. Serie de datos de grilla, período 1901 – 2002	73
4.14	Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto de la reserva útil del suelo. Serie de datos de grilla, período 1901 – 2002	73
5.1	Cuencas sedimentarias del Uruguay. Fuente: Oleaga (2002), modificado de De Santa Ana et al., 1994	74
5.2	Sección hidrogeológica representativa del modelo principal de flujo en dirección E-W. Tacuarembó-Salto (Oleaga, 2002a)	75
5.3	Situación de los perfiles elaborados en el área de estudio por Rodríguez et al. (2006)	82
5.4	Perfil de la Sección 1-1 (Rodríguez et al., 2006)	82
5.5	Perfil de la Sección 2-2 (Rodríguez et al., 2006)	83
6.1	Malla de elementos finitos del modelo de Campos (2000)	85
6.2	Área de estudio modelada	91
6.3	Modelo Digital del Terreno (alturas en metros)	93
6.4	Secciones transversales utilizadas para la confección de la estratigrafía 3D	94
6.5	a) Sólido interpolado a partir de la información de las perforaciones de la zona. b) Basaltos. c) Acuitardo más acuífero profundo	95
6.6	Perfiles típicos del modelo estratigráfico	96
6.7	Discretización espacial de la capa 1, basaltos	97
6.8	Discretización espacial de la capa 2, acuífero somero	98
6.9	Discretización espacial de la capa 3, acuífero somero y acuitardo	98
6.1	Discretización espacial de la capa 4, acuífero profundo	99
6.1.1a	Condiciones de borde empleadas en las capas 2, 3 y 4, Según correspondiera, indicadas entre paréntesis.	100
6.1.1b	Condiciones de borde utilizadas en el modelo de Rodríguez et al. (2006) y actuales, superpuestas al modelo digital del terreno	101
6.12	Ríos y arroyos simulados en el modelo y zonas de recarga	102
6.13	Pozos de bombeo simulados	108
6.14	Piezometría simulada en la capa 4, acuífero profundo	112
6.15	Comparación de la carga hidráulica simulada vs. observada en la capa 2	114

(acuífero somero) mediante barras de error	
6.16 Comparación de la carga hidráulica simulada vs. observada en la capa 3 (acuífero somero + acuitardo) mediante barras de error	115
6.17 Comparación de carga hidráulica simulada vs. observada mediante barras de error en la capa 4 (acuífero profundo)	116
6.18a Niveles observados vs. Simulados. Capa 2.	117
6.18b Niveles observados vs. Simulados. Capa 3.	117
6.18c Niveles observados vs. Simulados. Capa 4.	118
6.19 Vectores de flujo simulados en el acuífero somero (capa 2)	121
6.2 Vectores de flujo simulados en el acuífero profundo (capa 4)	121
6.21 Flujos de intercambio río / acuífero expresados en m <sup>3</sup> /d x 10 <sup>3</sup>	123
6.22 Esquema de flujos a través de las capas del modelo, expresados en 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /d	124
6.23 Análisis de sensibilidad respecto a la recarga sobre los basaltos	127
6.24 Flujos verticales y a través de los ríos en función de la recarga sobre las areniscas aflorantes	128
6.25 Error medio cuadrático (RMSE) en las capas 2 a 4 respecto a las variaciones en la tasa de recarga sobre las areniscas aflorantes	129
6.26a Líneas piezométricas en la zona del Parque Gran Bretaña, Rivera. Situación actual.	130
6.26b Líneas piezométricas en la zona del Parque Gran Bretaña, Rivera. Situación proyectada	131
6.27a Líneas piezométricas en una zona proyectada como futuro parque de perforaciones. Situación actual.	132
6.27b Líneas piezométricas en una zona proyectada como futuro parque de perforaciones. Situación proyectada	132

## Lista de tablas

3.1	Valores calculados de conductividad hidráulica a partir de ensayos de bombeo y de recuperación	50
3.2	Parámetros hidráulicos de las Formaciones Rivera y Tacuarembó	50
4.1	Metodologías disponibles para la estimación de la recarga en medios porosos	58
4.2	Datos meteorológicos disponibles	60
4.3	Estadísticos de las series de datos puntuales y de grilla	61
4.4	Comparación de valores de la recarga media anual (en mm/año)	70
6.1	Ríos simulados	103
6.2	Pozos de bombeo simulados en el modelo	105
6.3	Conductividades hidráulicas calibradas	111
6.4	Errores por capa	119
6.5	Flujos entrantes y salientes expresados en $10^3 \text{ m}^3/\text{d}$	124

## RESUMEN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) ocupa aproximadamente 1.200.000 km<sup>2</sup> distribuidos en Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay. El agua del SAG está contenida dentro de los poros y fracturas de areniscas sedimentarias de la cuenca geológica chaco-paranaense, debajo de un manto de basaltos de variada potencia. Las zonas de afloramiento del acuífero asociadas a áreas de recarga se encuentran en la periferia del mismo. Esta tesis tiene como zona de estudio unos 750 km<sup>2</sup> de la frontera uruguayo-brasilera, en torno a las ciudades de Rivera (Uruguay) y Santana do Livramento (Brasil).

El objetivo principal de este trabajo fue revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico/hidráulico del SAG en el área de estudio y validarlo mediante la simulación numérica, con énfasis en la estimación de la recarga, tanto directa proveniente de la precipitación como indirecta proveniente de la formación fisurada suprayacente a las areniscas. Además, dada la conocida incertidumbre asociada a la estimación de la recarga, se implementó un balance hídrico mensual con el fin de obtener una estimación independiente de dicha variable.

Mediante balance hídrico para la serie 1960-1997 se estimó una recarga promedio en la zona del SAG aflorante de 139,5 mm/año y una estimación gruesa sobre basaltos de 47,2 mm/año, 8,6 % y 2,9 % de la precipitación media anual, respectivamente.

El modelo numérico multicapa implementado reprodujo la situación observada en 2004-2005 bajo la suposición de estado estacionario. La calibración arrojó resultados satisfactorios: un ajuste muy bueno entre niveles observados y simulados y conductividades hidráulicas calibradas coherentes con los valores estimados a partir de ensayos de bombeo. El modelo indicaría la existencia de flujos descendentes entre capas, verificando la hipótesis de trabajo del proyecto. La recarga sobre los basaltos fue de 21,9 mm/año y sobre areniscas de 157 mm/año, equivalente a 1,35 % y 9,6 % de la precipitación media anual, respectivamente. Por ende, las dos metodologías de estimación

de recarga arrojaron resultados similares, compatibles con estimaciones de otros autores. Finalmente se presenta un análisis de dos escenarios futuros plausibles de explotación.

## ABSTRACT

The Guaraní Aquifer System (GAS) occupies approximately 1.200.000 km<sup>2</sup>, distributed in Brazil, Argentina, Paraguay and Uruguay. It is contained within pores and cracks of sedimentary sandstones in the Chaco – Paranaense geologic basin, underneath a mantle of basalts of variable thickness. The outcropping areas associated to recharge zones are located in the periphery of the aquifer. This thesis study area occupies 750 km<sup>2</sup> around the Uruguayan-Brazilian border, centered in the cities of Rivera (Uruguay) and Santana do Livramento (Brazil).

The main objective of this work was to revise the conceptual model representing the hydrogeologic / hydraulic behavior of the GAS in the study area and to validate it with numerical simulations, with emphasis on the estimation of recharge, both direct from precipitation and indirect from the overlying fractured basalts. In addition, considering the very well known uncertainty associated to recharge estimations, a monthly water balance to obtain an independent recharge estimation was implemented.

The average recharge rate estimated with the water balance for the 1960 –1997 series, for the outcropping area of the GAS was 139.5 mm/y and 47.2 mm/y over basalts, i.e. 8,6 % and 2,9 % of the annual average precipitation, respectively.

The multilayer numerical model implemented reproduced the observed situation for 2004 – 2005 under the steady state assumption. The calibration was satisfactory regarding observed and simulated hydraulic heads and calibrated hydraulic conductivities were coherent with values estimated from pumping tests. The model would indicate the existence of downward flows between layers, verifying this work hypothesis. The recharge was 21.9 mm/y over the basalts and 157 mm/y over the sandstones, equivalent to 1.35 % and 9.6 % of the annual average precipitation, respectively. In summary, the application of two different methodologies yielded similar results, compatible with other authors estimations.

Finally, two future pumping scenarios were analyzed with the model.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Marco de la tesis.

La presente tesis se enmarca en el proyecto de investigación denominado “Desarrollo metodológico para la evaluación de la recarga y vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en Argentina y Uruguay”, financiado por el Fondo de Universidades. Este fondo es un complemento del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG), creado con el objetivo de apoyar a las Universidades de la región para el desarrollo de proyectos de investigación y la capacitación de recursos humanos vinculados a temas relacionados con la preservación y gestión del SAG. Este trabajo, de carácter multidisciplinario, se desarrolló entre la Universidad Nacional del Litoral (responsable), el Instituto Nacional del Agua (INA), el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), de Argentina, y la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) de Uruguay.

### 1.2. Consideraciones generales.

El SAG fue denominado así por el geógrafo uruguayo Danilo Antón en homenaje al pueblo indígena Guaraní que ocupaba aproximadamente la misma extensión que el acuífero. El nombre fue propuesto en una reunión realizada en la ciudad de Curitiba, Brasil, el 26 de mayo de 1996 y fue aceptada por los hidrogeólogos presentes en la misma.

Este sistema constituye uno de los reservorios de agua subterránea más grandes del mundo y el mayor de América Latina, con un área de aproximadamente 1,2 millones de km<sup>2</sup> (Figura 1.1) y una capacidad de almacenamiento estimada en 45.000 km<sup>3</sup> (Araújo et al., 1995). Dicha extensión se reparte en los cuatro países que conforman el MERCOSUR de la siguiente forma: 840.000 km<sup>2</sup> en Brasil, 255.000 km<sup>2</sup> en Argentina, 71.700 km<sup>2</sup> en Paraguay y 58.500 km<sup>2</sup> en Uruguay.



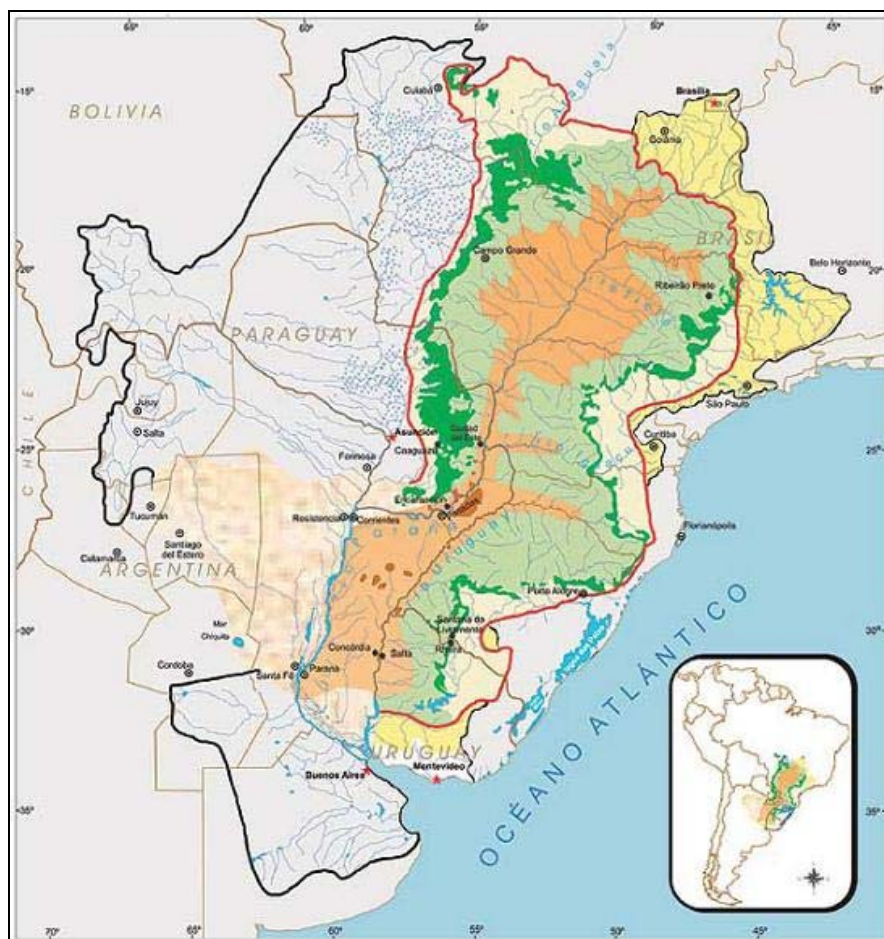


Figura 1.1: Mapa esquemático del Sistema Acuífero Guaraní. Las áreas color verde constituyen las zonas de afloramiento y de recarga directa, mientras que la zona naranja es zona de surgencia del acuífero. Fuente: [www.sg-guarani.org](http://www.sg-guarani.org)

El agua del SAG está contenida dentro de los poros y fracturas de areniscas sedimentarias ubicadas en la cuenca geológica chaco-paranaense, debajo de un manto de basaltos de variada potencia, siendo la calidad de sus aguas y su profundidad muy variables regionalmente (Pérez y Rocha, 2002). Las zonas de afloramiento del acuífero se encuentran en la periferia del mismo y es de destacar que al presente no se conoce con precisión su límite oeste en territorio Argentino.

Desde el punto de vista global, el SAG constituye uno de los sistemas acuíferos transfronterizos de mayor envergadura en el planeta. Dicho término se refiere al carácter trasnacional del mismo, ya que su desarrollo no se encuentra limitado a las fronteras de un único país sino que, como se mencionó anteriormente, atraviesa las de los cuatro países

integrantes del MERCOSUR, con impactos socioeconómicos, legales y ambientales relevantes para toda la región.

Más de 15 millones de personas viven en éste área, donde el acuífero está siendo cada vez más explotado, constituyendo una de las principales fuentes de agua dulce para el suministro de agua potable, así como también para usos industriales, agropecuarios y recreativos.

Entre los aspectos socioeconómicos se deben considerar: el acelerado crecimiento demográfico con el consecuente aumento de la demanda de agua potable; la concentración de la población en áreas urbanas y el acelerado crecimiento económico como fuerzas impulsoras de un deterioro y agotamiento del recurso hídrico, entre otros factores.

La Figura 1.2 muestra un esquema hipotético del flujo subterráneo a través de un límite internacional (línea punteada), el que evidencia que cualquier actividad o acción que se lleve a cabo en un lado de la frontera puede repercutir en el otro, ya sea en términos de explotación como de calidad del agua subterránea.

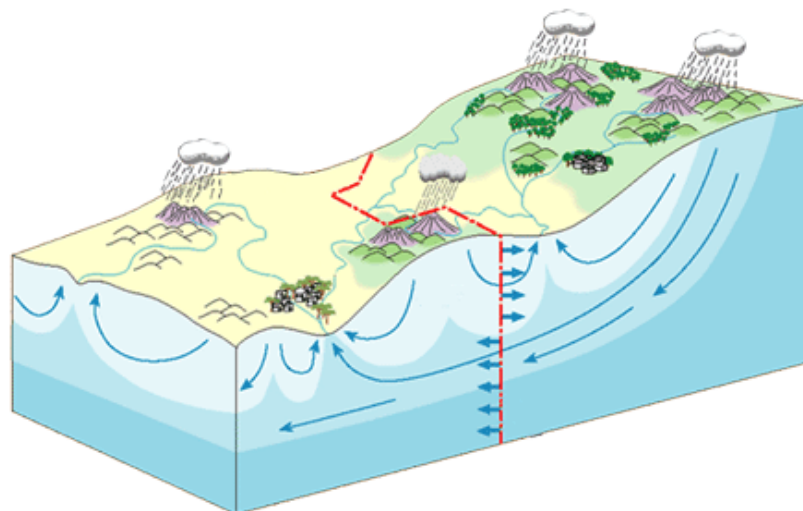


Figura 1.2: Esquema de flujos en un sistema transfronterizo. La línea punteada representa el límite político entre los dos hipotéticos países. Fuente: [www.sg-guarani.org](http://www.sg-guarani.org)

En este sentido es necesario conocer y comprender cómo funcionan estos sistemas basándose en estudios técnicos detallados y fehacientes, tanto para la identificación y

delimitación de estos sistemas; el análisis de sus parámetros hidráulicos y sus niveles piezométricos; la delimitación de las zonas de recarga y descarga; la caracterización de su comportamiento (confinado, semi-confinado o libre) como para el análisis de su vulnerabilidad a los diferentes usos de suelo y agentes contaminantes. El conocimiento técnico debe enmarcarse en el contexto del desarrollo actual y planificado en cada zona, en particular en lo referente al abastecimiento del recurso de agua para así evitar potenciales conflictos de gerenciamiento.

Los impactos en el ambiente, tanto natural como social, son una consecuencia de lo mencionado en los párrafos anteriores, a lo que hay que agregarle los aspectos que hacen a la conservación de la biodiversidad o de ecosistemas sustentados por las aguas subterráneas, o el impacto del cambio climático sobre las mismas, que aún no está debidamente cuantificado y acotado.

Desde el punto de vista legal existe un vacío de legislación en derecho internacional en la materia, agravado por la posible existencia de leyes opuestas o contradictorias en cada uno de los países que comparten el recurso (UNESCO, 2001). Sin embargo, se puede mencionar la firma de diversos acuerdos bilaterales en situaciones particulares, como por ejemplo el firmado en 1973 entre México y EEUU que regula la extracción volumétrica anual de agua subterránea en el territorio de ambos países a lo largo de los 8 Km de frontera en los estados de Arizona y Sonora (UNESCO, 2001), y la voluntad de encontrar situaciones de equilibrio que favorezcan el manejo sustentable.

Además del SAG existen en el mundo otros sistemas acuíferos de grandes dimensiones, muchos de ellos transfronterizos, tales como el Yrendá Toba Tarijeño (compartido entre Bolivia, Paraguay y Argentina, de aproximadamente 1.000.000 km<sup>2</sup>), Ogallala (compartido entre varios estados de EEUU, 453.250 km<sup>2</sup>), North-Western Sahara Aquifer System-NWSAS (Argelia, Libia, Túnez, 1.000.000 km<sup>2</sup>), Nubian Sandstone

Aquifer System-NSAS (Chad, Egipto, Libia, Sudan, 2.000.000 km<sup>2</sup>), y Great Artesian Basin (Australia, 1.735.300 km<sup>2</sup>) (UNESCO, 2001).

Estos acuíferos transfronterizos actualmente constituyen tópicos estratégicos de varias agencias internacionales de financiamiento para investigaciones científicas y técnicas, cuyo objetivo común es favorecer la sistematización y el intercambio de información para una correcta gestión y manejo sustentable de los recursos hídricos, siempre a través de un enfoque multidisciplinario.

Un ejemplo de estas líneas de investigación es el Programa International Shared (Transboundary) Aquifers Resources Management (IASRM), auspiciado por la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Food and Agricultural Organization (FAO), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) y la International Association of Hydrogeologists (IAH), que busca fomentar la cooperación entre los países para desarrollar el conocimiento científico y eliminar potenciales conflictos (UNESCO, 2001).

Desde 2003, la Organización de los Estados Americanos (OEA) es otro organismo que está trabajando con los países americanos en la coordinación del intercambio de información científica a fin de evaluar el grado de importancia de estos acuíferos transfronterizos. En este marco, además del SAG se han considerado dos estudios de caso prioritarios para proyectos piloto: los acuíferos Artibonito y Masacre, que comparten Haití y la República Dominicana, y el acuífero Yrendá Toba Tarijeño, que comparten la Argentina, Paraguay y Bolivia.

### **1.3. Consideraciones particulares del SAG.**

El SAG se encuentra emplazado en una región con un desarrollo económico y demográfico creciente en los últimos años, por lo tanto una visión multidisciplinaria de

gerenciamiento del recurso es indispensable si se quiere utilizar el acuífero de una manera sustentable.

Bajo esta realidad el Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG, 2007) es un primer paso hacia dicho objetivo. Entre los principales productos esperados del proyecto se encuentran: la generación de una base de datos unificada y actualizada disponible para todos los actores de la comunidad, especialmente para los encargados de la toma de decisiones referentes al uso y conservación del acuífero, tanto a nivel regional como local (proyectos pilotos); una ficha de pozos estandarizada para el inventario y muestreo de pozos; el diseño de una futura red de monitoreo; mapas temáticos diversos a escala regional (1:3.000.000 a 1:1.000.000); el modelo regional conceptual y numérico (simulación de flujos, de grandes extracciones y niveles piezométricos); la evaluación certera del potencial de uso (termal y no termal) del acuífero; y evaluaciones técnico-socio-económicas así como también proyecciones de demandas y escenarios futuros, todo ello basado en investigación hidrogeológica.

Este proyecto se encuentra en fase de ejecución, se inició en marzo de 2003 estando prevista su conclusión en febrero de 2009, y es financiado principalmente por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, Global Environmental Fund del Banco Mundial), y otras agencias cooperantes. La gestión del proyecto es realizada por la Organización de los Estados Americanos (OEA) y representantes de los cuatro países que contienen el SAG.

El PSAG está estructurado en siete componentes: I) Expansión y consolidación de la base actual del conocimiento científico y técnico acerca del SAG; II) Desarrollo e instrumentación conjunta de un marco de gestión para el SAG, basado en un Programa Estratégico de Acción acordado; III) Fomento a la participación pública y de los actores interesados, a la comunicación social y a la educación ambiental; IV) Evaluación y

seguimiento del proyecto y disseminación de sus resultados; V) Desarrollo de medidas para la gestión de las aguas subterráneas y para la mitigación de daños en áreas críticas (“hot spots”) de acuerdo con las características de cada región.; VI) Consideración del potencial para la utilización de la energía geotérmica “limpia” del SAG; y, VII) Coordinación y gestión del proyecto (PSAG, 2007).

Como se dijo anteriormente, uno de los productos que se espera generar con el PSAG es el modelo conceptual de funcionamiento del sistema, que integrará la información proveniente de variadas fuentes y disciplinas.

El desarrollo de modelos matemáticos en el marco del PSAG será una herramienta útil y necesaria para mejorar dicho modelo conceptual de funcionamiento del sistema e identificar posibles incertidumbres del mismo. Para ello es imprescindible contar con datos consistentes y confiables, como por ejemplo a partir de la base de datos unificada (UNESCO, 2001).

#### **1.4. Descripción preliminar del SAG.**

En las últimas décadas, numerosos investigadores y profesionales se han abocado al estudio de diversos aspectos del SAG, plasmados en innumerables publicaciones cuya revisión excede largamente los objetivos de esta tesis. En esta sección se realiza una descripción preliminar del SAG en la zona fronteriza entre Brasil y Uruguay, motivo de este estudio.

El agua del SAG está contenida dentro de los poros y fracturas de las areniscas de la formación Tacuarembó o Botucatú, según se la denomina en Uruguay o Brasil, respectivamente. En la parte norte del Uruguay el acuífero aflora en superficie, profundizándose en la dirección oeste cuando entra en territorio argentino.

La Formación basáltica Arapey o Serra Geral (nuevamente con diferente nomenclatura según se mencione en Uruguay o en Brasil, respectivamente) sobreyace las

areniscas de la Formación Tacuarembó que componen el SAG, el que predominantemente se comporta como acuífero confinado o semi-confinado y en menor medida como libre en las áreas de afloramiento de las areniscas o sus cercanías (Montaño et al., 1998; Bossi y Schipilov, 1998).

El área circundante a las ciudades de Rivera (Uruguay) y Santana do Livramento (Brasil) se caracteriza por ser una zona de afloramiento de las areniscas del SAG y por la presencia del frente de coladas basálticas. Esta zona ha sido objeto de análisis en diversos estudios hidrogeológicos como ser los trabajos de Pessi y Hardy (1998), Decoud y Rocha (2000), Pérez y Rocha (2002) y Pacheco (2004), entre otros. El SAG en esta región se comporta como un acuífero multicapa, con transmisividades en el orden de 25 a 139 m<sup>2</sup>/d y conductividades estimadas entre 0,48 y 1,66 m/d (Flores Machado, 2005). Sin embargo, aún existen ciertas incertidumbres acerca de la conectividad hidráulica entre las diversas capas que conforman y/o confinan el mismo y los flujos asociados.

La zona de recarga ha sido generalmente circunscripta solamente a las áreas de afloramientos del SAG. Diversos autores calcularon la recarga directa proveniente de las precipitaciones con resultados del orden del 3 al 5 % de la precipitación media (Montaño y Carrión, 1990; Pacheco, 2004; entre otros). Además, Silva Busso (1999) y Oleaga (2002) han indicado que en sectores de poco espesor de basalto y con importante fisuración, es posible que este acuífero fisurado suprayacente recargue al SAG. Uno de los objetivos de este trabajo es estimar la recarga indirecta que alcanzaría el acuífero luego de su paso por los basaltos fracturados suprayacentes en la zona perimetral de afloramiento del SAG.

Ante este aparente escenario, y en el marco del proyecto interdisciplinario del Fondo de Universidades, se analizó el comportamiento hidrogeológico del conjunto basalto-areniscas en este área reducida del norte de Uruguay combinando herramientas tradicionales tales como el análisis geológico-estructural y el análisis piezométrico e hidrogeoquímico, para finalmente integrar dicha información en un modelo conceptual de funcionamiento de

carácter local, tareas realizadas en conjunto con el resto de los integrantes del grupo de trabajo.

Dicho modelo conceptual fue validado mediante un modelo numérico que, además, permitió cuantificar las tasas de recarga en el área, siendo este punto el eje central de la presente tesis.

Entre los antecedentes de modelación del SAG pueden citarse los trabajos de Campos (1998) y Vives et al. (2001), los que constituyen una importante contribución a la simulación preliminar del comportamiento hidrogeológico del SAG. Sin embargo, estas simulaciones no incluyen las formaciones confinantes del mismo. Más recientemente, Vassolo (2005) presentó un premodelo del SAG en el sector sureste del Paraguay donde utilizó herramientas de modelación similares a las previstas de utilizar en la presente tesis aunque sin incorporar los aspectos estructurales.

Los resultados esperados de la tesis permitirán obtener un conocimiento más completo del comportamiento hidráulico del SAG en un área tan particular, pudiendo extenderse a otras zonas similares o utilizarse con fines de una gestión sustentable del recurso.

### **1.5. Motivación y objetivos.**

Reconociendo que se vienen realizando esfuerzos crecientes, los estudios relacionados a diferentes aspectos de las aguas subterráneas de la región aún no poseen el grado de desarrollo alcanzado en los países más desarrollados (CE 2005; BGS 2005). Es necesario entonces aplicar el mayor conocimiento científico disponible y desarrollar técnicas avanzadas de análisis con el fin de mejorar el conocimiento actual acerca del funcionamiento de este sistema y así contribuir a la gestión sostenible de los recursos subterráneos de la región.



Los modelos numéricos de flujo subterráneo constituyen una valiosa herramienta que facilita el entendimiento de sistemas de aguas subterráneas y ayuda a predecir los cambios que éstos pueden experimentar ante la implementación de diferentes decisiones de manejo del recurso.

El objetivo principal de la tesis es revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico/hidráulico del Sistema Acuífero Guaraní en el área de estudio y validarlo mediante la simulación numérica, con énfasis en la estimación de la recarga, tanto directa proveniente de la precipitación como indirecta proveniente de la formación fisurada suprayacente.

Entre los objetivos específicos se encuentran:

- ✓ Analizar detalladamente la información de perforaciones existente, tanto estratigráfica como de ensayos de bombeo, con el fin de estimar los parámetros hidrogeológicos de la zona.
- ✓ Estimar la recarga del sistema mediante las metodologías aplicables al caso.
- ✓ Implementar un modelo numérico que valide el modelo conceptual.

## **1.6. Contenido de la tesis.**

Para su mejor comprensión, la tesis se divide en 7 capítulos. En el primero de ellos se expusieron la motivación del trabajo, los objetivos buscados y los antecedentes existentes en el tema. En el capítulo 2 se realiza la descripción del área en estudio a nivel regional y se brinda una breve caracterización geológica e hidrográfica. El capítulo 3 contiene toda la información hidrogeológica de la región empleada para definir el modelo conceptual de funcionamiento del sistema. Dicho modelo se confeccionó en base a información estratigráfica, piezométrica e hidroquímica recopilada y generada durante el trabajo de investigación. Si bien se revisó brevemente el funcionamiento global del SAG, el énfasis está puesto en la región de la frontera uruguayo-brasilera del acuífero. Por otro

lado, en el capítulo 4 se presentan los diferentes métodos de estimación de la recarga así como también el cálculo de la misma en la zona de estudio mediante balance hídrico. El modelo conceptual de funcionamiento se propone en el capítulo 5 y en base a éste se implementa el modelo numérico en el capítulo 6. Por último, el capítulo 7 brinda las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

En este capítulo se presentan aspectos generales del área de estudio. En particular se describe su ubicación geográfica en el contexto de SAG, con énfasis en el conglomerado urbano Rivera-Santana do Livramento debido al uso intensivo del recurso en dicha zona. La descripción del clima comprende un análisis general de la distribución de precipitaciones, temperaturas y vientos. Las dos primeras variables son insumos fundamentales para el cálculo del balance hídrico el cual permite estimar la recarga al acuífero. Tomando como base el trabajo de campo y gabinete realizado en el proyecto del Fondo de Universidades, se presenta una caracterización detallada de la geología de la zona. Finalmente se describe la hidrografía, analizada por subcuencas.

#### **2.1. Ubicación.**

Durante la ejecución del proyecto del Fondo de Universidades la elección del área de estudio se realizó considerando ciertos aspectos fundamentales, como ser: la presencia de las formaciones que conforman el SAG; la disponibilidad de información de perforaciones y la posible vulnerabilidad de dichas formaciones a los agentes contaminantes. En primera instancia, por la mayor densidad de información, se evaluaron dos de las tres zonas potenciales de trabajo (Figura 2.1), los complejos urbanos de Rivera - Santana do Livramento y de Artigas - Quarai, ambos en la frontera brasilero-uruguaya, incluidos en la denominada Cuenca Norte de la República Oriental del Uruguay.

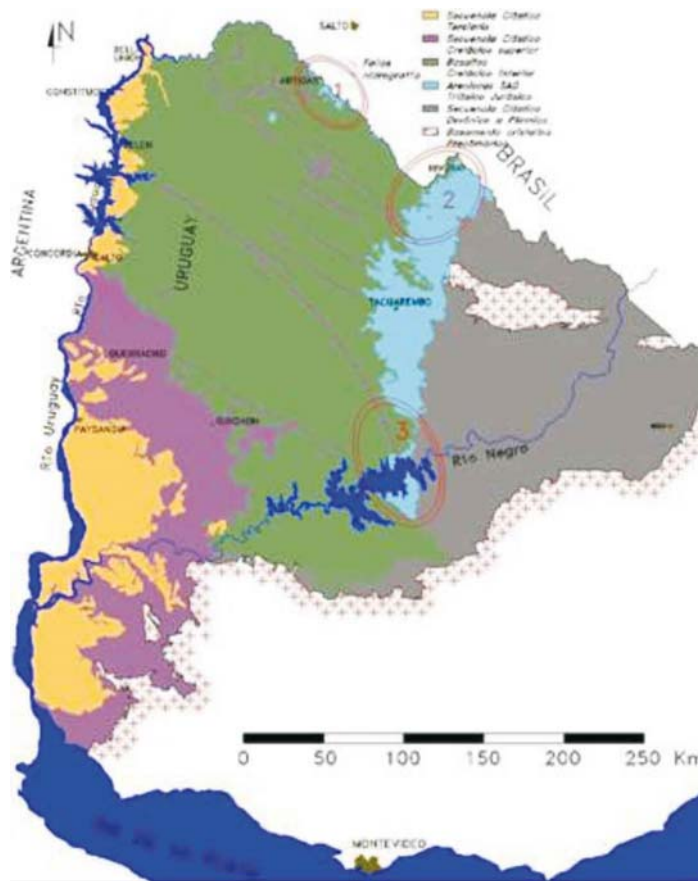


Figura 2.1: Mapa geológico simplificado de la Cuenca Chaco-Paranaense en Uruguay, incluyendo principales fallas del área y posibles zonas para áreas piloto de investigación. 1: Artigas – Quarai; 2: Rivera – Santana do Livramento; 3: Sur del área aflorante. Observar que las tres áreas comprenden sectores de afloramiento de areniscas. Fuente: Oleaga (2002) y Rodríguez et al. (2006).

La búsqueda preliminar de información, complementada con una visita de reconocimiento a ambas zonas, permitió concluir que la zona de Rivera - Santana do Livramento (zona 2 en la Figura 2.1, representada en la Figura 2.2) presentaba ciertas ventajas comparativas, en particular mayor cantidad de perforaciones, mayor acceso a la información facilitado por el conocimiento previo de los integrantes del grupo de trabajo, y el desarrollo paralelo de otros proyectos del Fondo de Universidades, situación ésta que permitiría el intercambio de información y de experiencias, y la optimización de los recursos asignados al proyecto (Rodríguez et al., 2006).

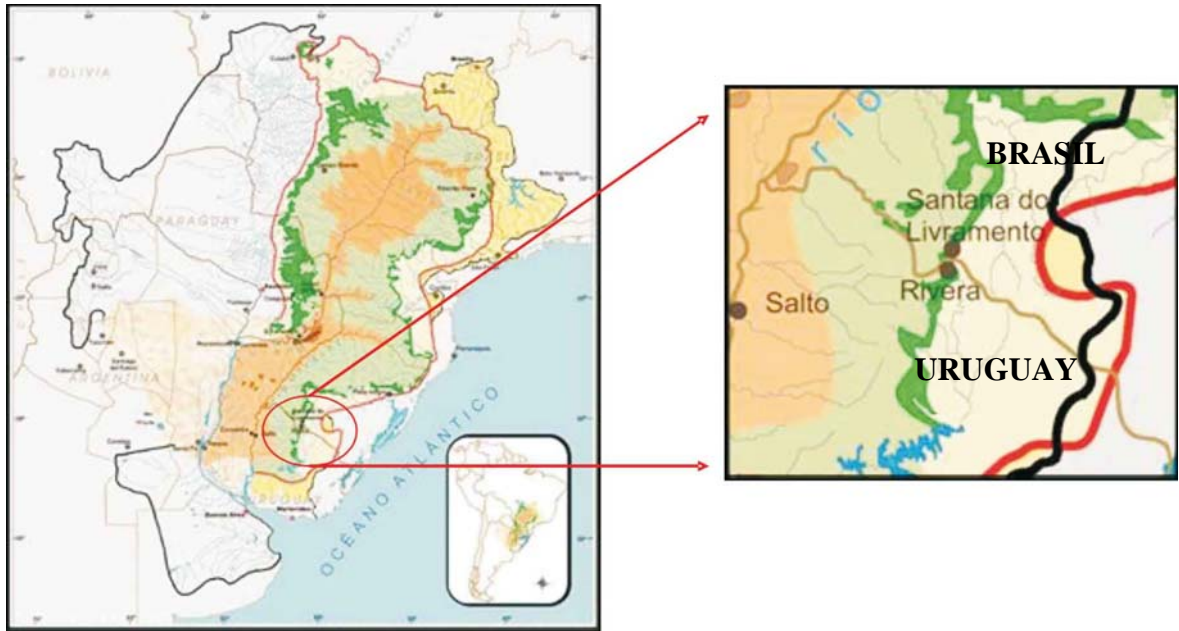


Figura 2.2: Ubicación del área de estudio en el entorno del SAG. Latitud: 30° 53,8' S - Longitud: 55° 32,6' W - Altitud: 241,94 m. Fuente: Modificado de SAG, 2004

Por otra parte, y también en el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG), en la zona seleccionada se está llevando a cabo desde 2003 el Proyecto Piloto denominado Rivera - Santana do Livramento, que no es más que un Plan de Gestión cuyo objetivo primordial es probar, en condiciones reales y con la participación de la sociedad, medidas de gestión que puedan replicarse en áreas representativas de cada uno de los cuatro países integrantes del SAG, hecho que acrecentaría el valor agregado de la presente tesis.

El sistema de coordenadas de trabajo elegido es el Universal Transversal Mercator (UTM, zona 21), sistema oficial del PSAG, por lo tanto toda la información presentada, salvo que explícitamente se especifique lo contrario, está referida al mismo.

Las ciudades de Rivera y Santana do Livramento se encuentran apenas separadas por una amplia avenida y el Parque Internacional, y cuentan con un importante intercambio social, económico y cultural, lo que ha llevado a denominar a la región como *Frontera de la Paz*. La población en este aglomerado asciende a 160000 habitantes (INE, 2004; SAG, 2005). En cuanto a los servicios de saneamiento en la ciudad de Santana, la red de agua

potable alcanza al 99.5% de la población, mientras que la de alcantarillado cubre solamente el 40%, siendo los asentamientos irregulares los que mayormente carecen de este último servicio. En el caso de Rivera la cobertura de agua potable es del 94 % y la del alcantarillado es una de las más bajas del Uruguay, con un 30 %, lo que representa una importante fuente de contaminación (SAG, 2004).

Otros factores que hacen vulnerable el recurso hídrico subterráneo en esta zona son la disposición no controlada de los residuos sólidos domiciliarios y la existencia de un gran número de estaciones expendedoras de combustible, algunas de las cuales han sido instaladas hace varios años atrás, las que potencialmente presentan pérdidas en sus tanques de almacenamiento subterráneos.

## **2.2. Clima.**

El clima de la zona de Rivera - Santana do Livramento es muy agradable, con indudables influencias subtropicales, donde el calor y las precipitaciones son acentuadas.

La precipitación media en Rivera es de 1639 mm/año (Figura 2.3). La temperatura media anual es de unos 17,5 °C (Figura 2.4), la isoterma tiene una orientación general del NE al SW y sus valores decrecen hacia el sudeste. Las temperaturas más altas se presentan en los meses de enero y febrero y las más bajas en junio y julio (DNM, 2006). La clasificación climática es de clima templado lluvioso.

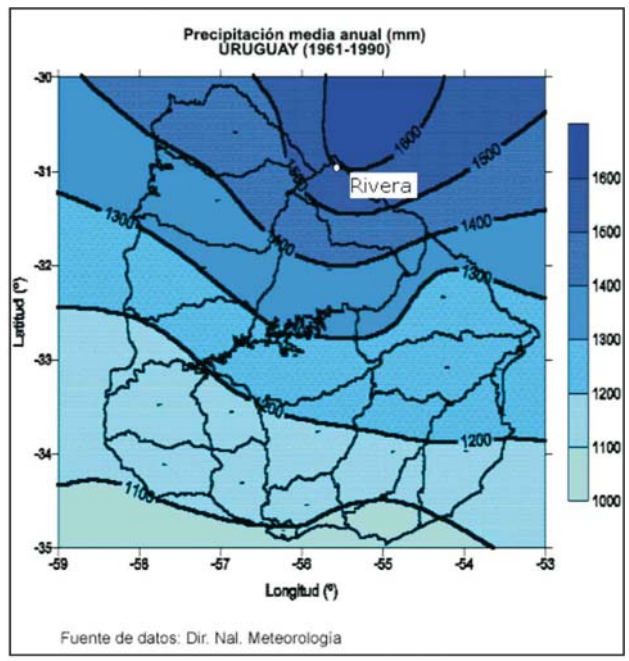


Figura 2.3: Precipitación media anual en Uruguay. Fuente: DNM, 2006.

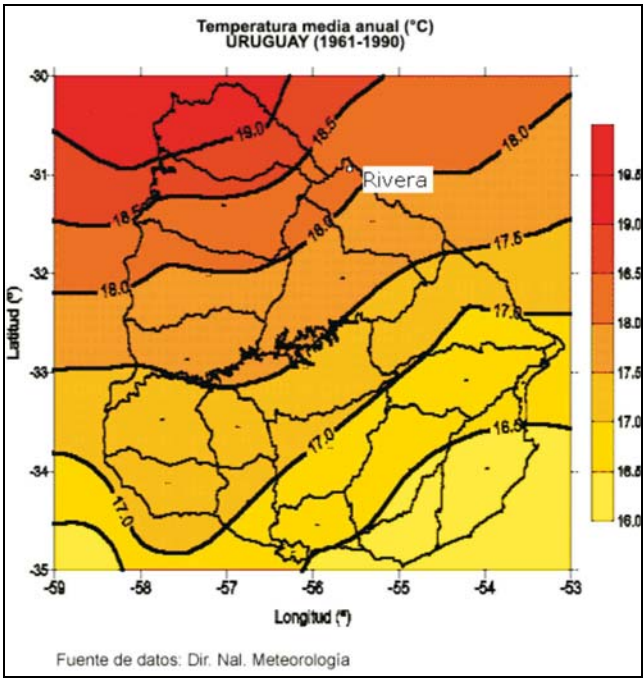


Figura 2.4: Temperatura media anual en Uruguay. Fuente: DNM, 2006.

Como término medio la temperatura más alta se registra después de las 13 horas en verano y después de las 14 horas en invierno, mientras que la mínima se produce a la hora

de salir el sol en ambos casos. La humedad relativa del aire, en promedio, oscila entre el 72 y el 77%.

El régimen de vientos más frecuentes acusa un marcado predominio del sector E - NE; las velocidades medias son del orden de los 15 km/h: son frecuentes vientos superiores a 30 km/h, con situaciones puntales de tormenta que oscilan entre 65 a 130 km/h y velocidades máximas registradas del orden de los 200 km/h.

Respecto al balance hídrico en la zona, en los meses de diciembre a febrero se presenta un pequeño déficit hídrico, con un déficit medio de 132 mm, y de mayo a octubre un excedente de 257 mm promedio (DNM, 2006).

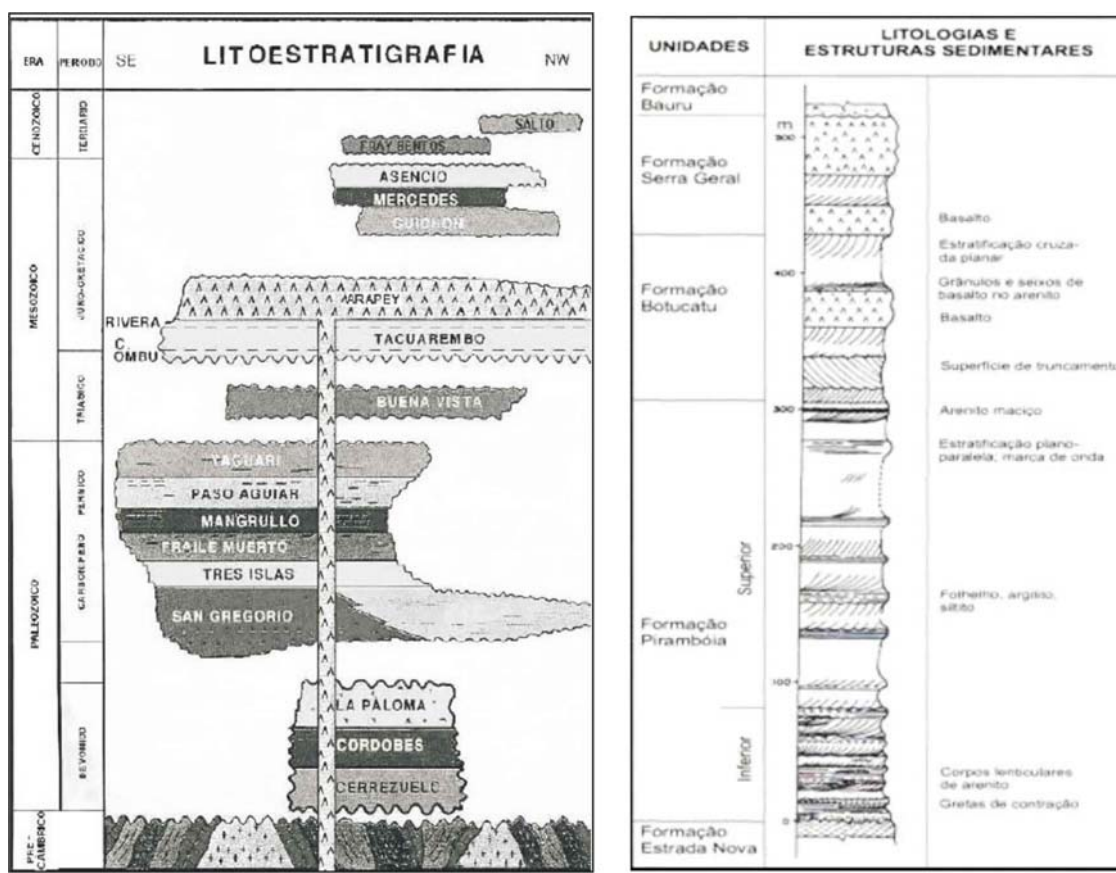
### **2.3. Geología.**

Respecto al análisis de la geología del área de estudio el mayor problema residió en la identificación de las formaciones relevantes a partir de la información litoestratigráfica de perforaciones y de los estudios geológicos, debido a que la nomenclatura utilizada tanto en Brasil como en Uruguay difiere entre sí.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.5, se presentan dos perfiles estratigráficos representativos del SAG confeccionados, en el primer caso, por autores uruguayos y, en el último, por geólogos brasileños. Las diferencias a remarcar son aquellas relacionadas a la Formación Arapey (basaltos suprayacentes al SAG) que en Brasil se denomina Formación Serra Geral, y a la Formación Tacuarembó que es equivalente a la Formación Botucatu, al norte de la frontera internacional.

La Formación. Tacuarembó es a la que se atribuye el sector aflorante del SAG en Uruguay (Collazo, 2006). En este sentido, otro aspecto problemático fue la diferenciación de esta formación en sus miembros superior e inferior, a lo que otros autores le atribuyeron el carácter de Formación. Rivera y Formación Tacuarembó, respectivamente (Montaño y Pessi, 1985).





a) b)  
 Figura 2.5: Comparación de perfiles estratigráficos en Uruguay (a: Santana, 1994) y Brasil (b: Chang, 1997)

La síntesis presentada en esta sección refleja parte del trabajo multidisciplinario desarrollado en el proyecto del Fondo de Universidades que da marco a la presente tesis, y que sirvió para definir la geología del área.

La región se caracteriza por un predominio de las areniscas de la Formación Tacuarembó, cerros de basaltos de la Formación Arapey y sedimentos recientes próximos a los cauces principales. Al oeste de la Ruta N° 5 (que nace en Rivera y atraviesa Uruguay de Norte a Sur), y hasta el comienzo de las coladas basálticas, predomina en superficie el miembro superior de la Formación Tacuarembó, denominado como Formación Rivera por Montaña y Carrión (1990).

En su gran mayoría, el SAG presenta litologías arenosas depositadas por sistemas aluviales, fluviales y lacustres, bajo condiciones climáticas cálidas y un régimen de

humedad variable (con predominio de condiciones de aridez a semiaridez), con recurrentes episodios eólicos asociados, algunos de ellos de importante potencia (centenas de metros). Por lo anterior, es común la presencia, aunque en forma subordinada, de estratos y lentes pelíticos y conglomerádicos intercalados a las potentes sucesiones arenosas mesozoicas. Estas litologías y sus atributos espaciales (arquitectura, extensión, etc.) tienen una incidencia particular y significativa en las características hidrodinámicas del flujo a escala local (SAG, 2006).

El estudio de las características estructurales del área de trabajo constituyó un elemento esencial para el conocimiento del funcionamiento del sistema y la evaluación de la recarga. Este análisis se realizó mediante el reconocimiento en el terreno y se complementó con la interpretación de la cartografía básica, de fotografías aéreas y de imágenes satelitales con el fin de detectar lineamientos de decenas y hasta centenares de kilómetros de largo, interpretadas como zonas de fracturación.

Se identificaron dos tipos de fracturación importantes: una más somera relacionada con el diaclasamiento de la roca basáltica de poca profundidad, mayor dispersión de sus rumbos, interconexión entre fracturas y de poca expresión regional que controlaría acuíferos más superficiales; un segundo grupo de fracturas se relacionaría con los fallamientos directos que involucran desplazamiento vertical y horizontal de unidades geológicas, de alcance más regional y más profundas que las anteriores, que controlarían no sólo las unidades basálticas sino también las unidades clásticas del acuífero en profundidad.

Considerando los lineamientos más someros en los basaltos de la Fm. Arapey en Uruguay, sobre un total de 366 lineamientos mapeados, predominaron aquellos que presentan una dirección dominante E-O. La roseta de lineamientos (Figura 2.6), trazada sobre la base de la frecuencia, presenta un rumbo medio de  $81,3^\circ$  y una distribución que se

asemeja a la normal. El histograma de la longitud de los lineamientos (Figura 2.7) mostró una distribución asimétrica de media 340 m y un elevado desvío estándar de más de 300 m.

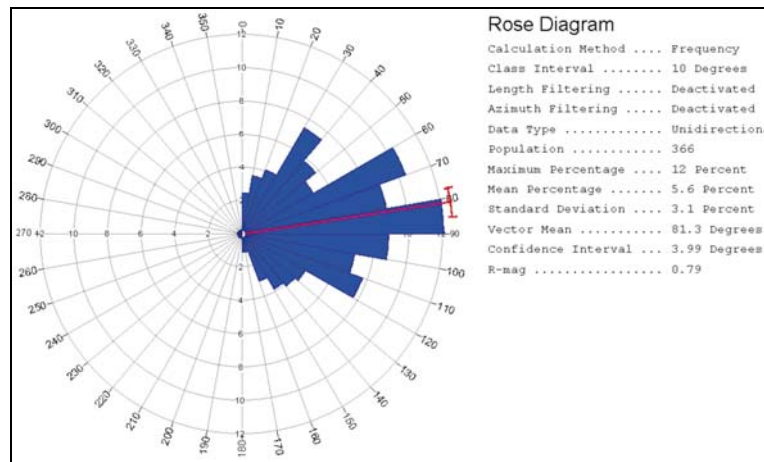


Figura 2.6: Roseta de lineamientos presentando la frecuencia de los lineamientos identificados a partir de sensores remotos (Rodríguez et al., 2006).

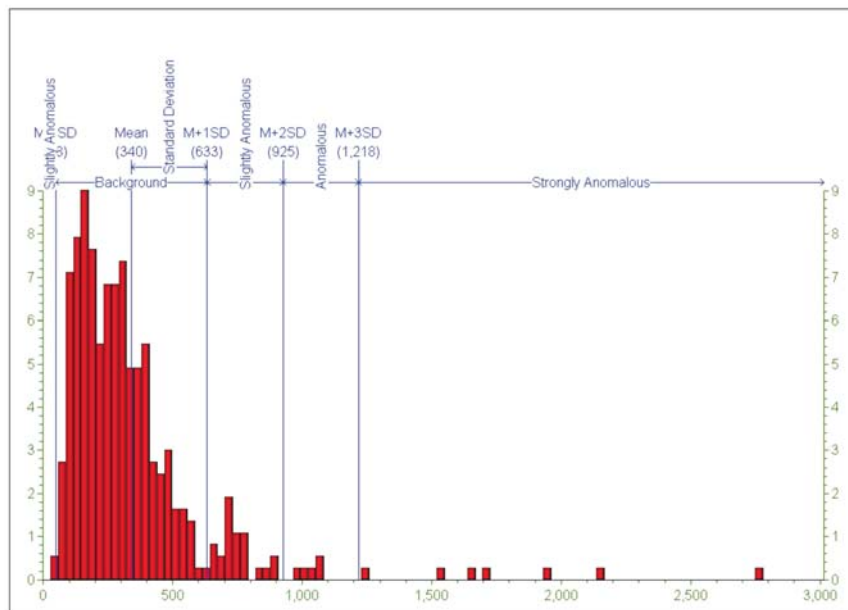


Figura 2.7: Histograma de longitud (eje horizontal: longitud de lineamientos; eje vertical: número de lineamientos) (Rodríguez et al., 2006).

La Figura 2.8 muestra el mapeo de todos los lineamientos considerados en la zona de afloramiento de las coladas de la Fm. Arapey. Durante la ejecución del proyecto del Fondo no se pudieron mapear los lineamientos en territorio brasilero por no contarse con la información básica necesaria. Por lo tanto se asumió una distribución de lineamientos similar a ambos lados de la frontera.

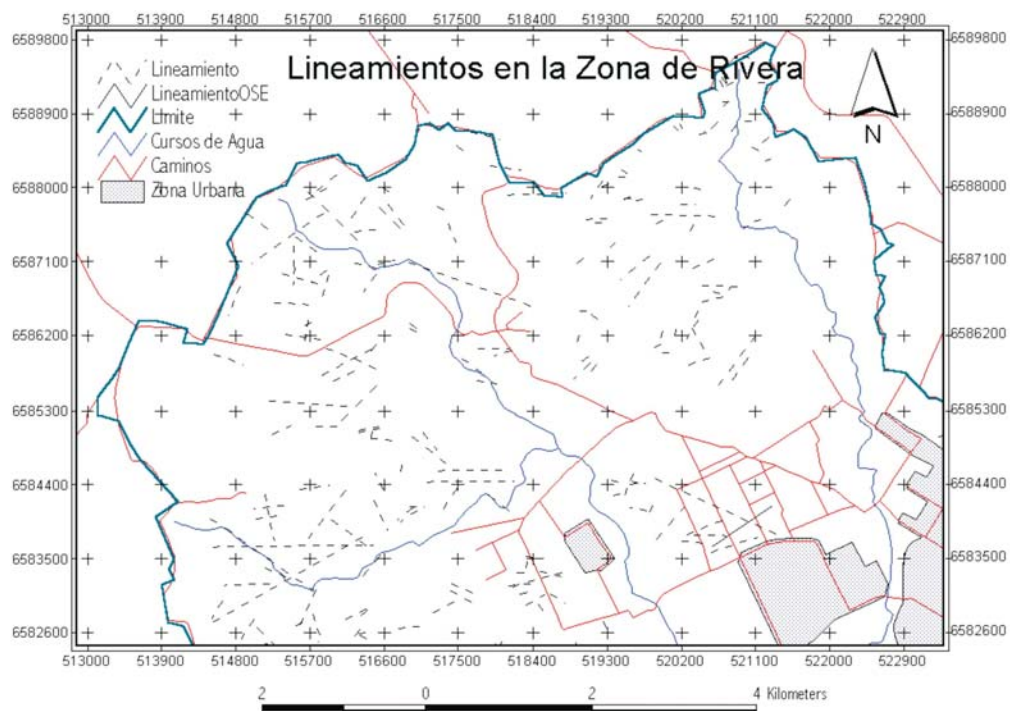


Figura 2.8: Lineamientos en la zona de afloramiento de basalto en las cercanías de la localidad de Rivera (Rodríguez et al., 2006).

En la fotointerpretación de gabinete se identificaron formas del relieve, materiales geológicos, zonas de fracturas, identificación de áreas con tonalidades más oscuras, red hidrográfica y cuerpos de agua, y se delimitaron áreas de afloramientos de basaltos, correspondientes al Grupo Arapey, a las areniscas de la Formación Tacuarembó-Rivera y zonas correspondientes a los valles aluviales. La delimitación de las dos formaciones fue completada con el mapeo de la Formación Serra Geral en territorio brasilero. Esta información constituyó uno de los elementos utilizados en la construcción del modelo numérico.

Sobre la base del mosaico de fotos aéreas georreferenciadas, y mediante el empleo de información geográfica, se realizó la representación gráfica de las distintas unidades geológicas de la zona de Rivera que se muestra en la Figura 2.9.

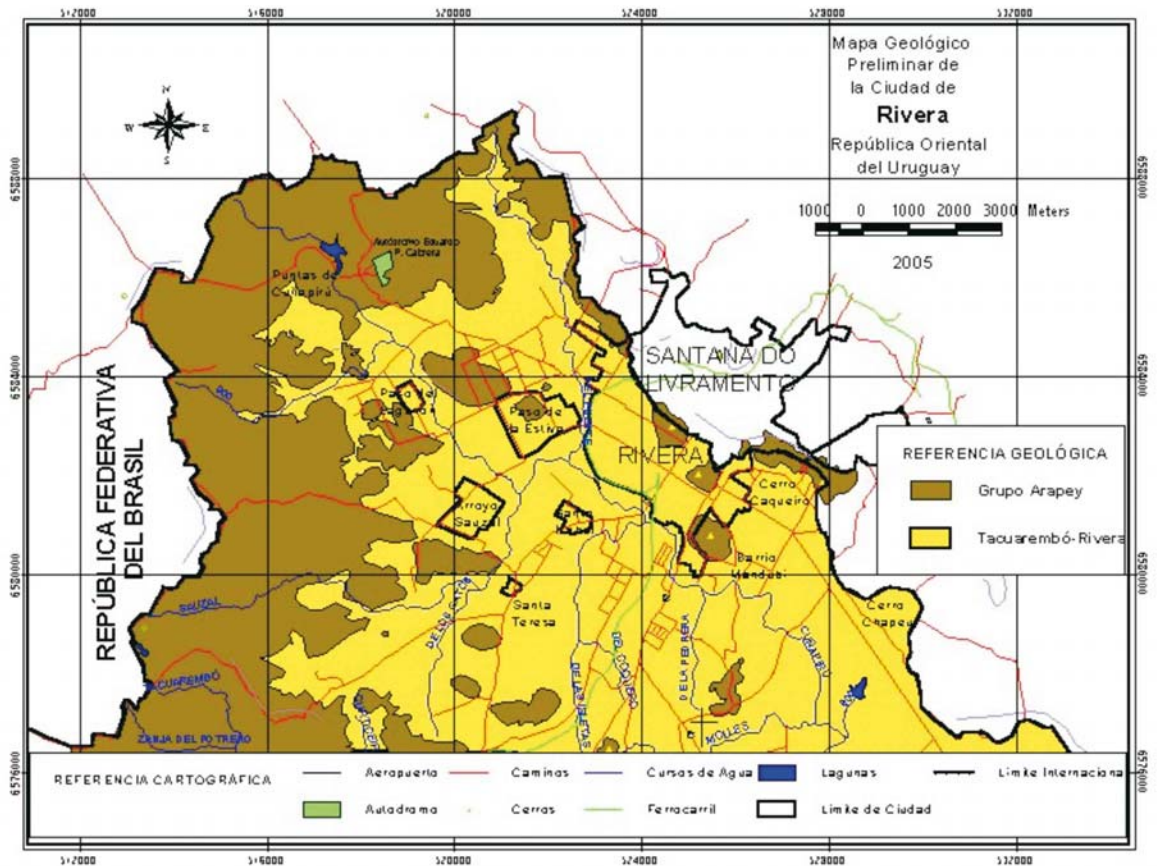


Figura 2.9: Mapa geológico de la ciudad de Rivera y sus alrededores (Rodríguez et al., 2006)

En el trabajo de la fotointerpretación de gabinete se siguió la siguiente metodología:

a) Interpretación visual en las aerofotografías y en la imagen Landsat TM mejorada digitalmente de: formas del relieve (geoformas), materiales geológicos, áreas de afloramientos, zonas de fracturas, identificación de áreas con tonalidades más oscuras (por su relación con el contenido de humedad, etc.), red hidrográfica y cuerpos de agua.

b) Delimitación de foto-unidades tales como áreas de afloramientos de basaltos, correspondientes al Grupo Arapey, de areniscas de la Formación Tacuarembó-Rivera y zonas correspondientes a los valles aluviales.

La delimitación de las dos formaciones fue completada con el mapeo de la Formación Serra Geral en territorio brasilero. En la Figura 2.10 se superpusieron los lineamientos y los fallamientos al mapeo de la Formación Arapey. Dichos lineamientos se

identificaron sólo en cartografía e imágenes satelitales correspondientes al sector uruguayo, de ahí su limitada extensión geográfica (sólo en el centro oeste del sector).

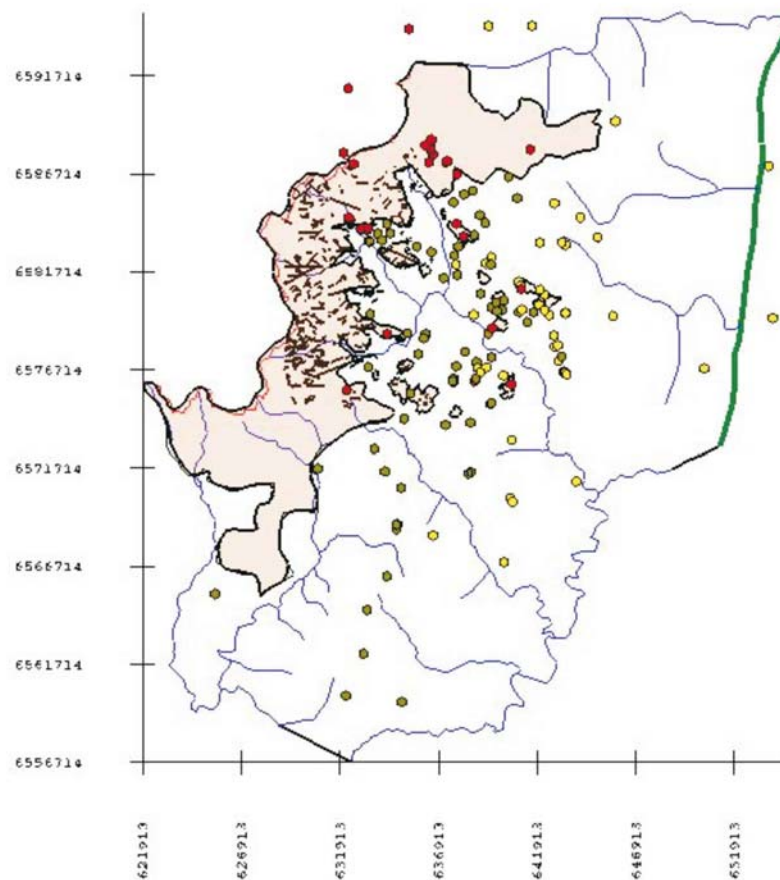


Figura 2.10: Mapeo de la Formación Arapey en el área de estudio, junto a sus lineamientos y fallamientos. Los círculos representan perforaciones analizadas (rojos: Formación Arapey; marrones: Formación Rivera; amarillos: Formación Tacuarembó).

#### 2.4. Geomorfología.

La naturaleza rocosa del terreno, ya sean basaltos o areniscas, hace que se produzcan saltos y quebradas, confiriéndole a la zona un paisaje único de sierras y cuchillas (Collazo et al., 2005).

Topográficamente el área presenta, en general, pendientes suaves, con alturas máximas de 400 m sobre el nivel del mar. Sin embargo, el pasaje entre los basaltos y las areniscas subyacentes puede identificarse rápidamente en campo o en la cartografía a partir de curvas de nivel de pronunciadas pendientes. Las cotas mínimas rondan los 130 m.s.n.m.

## **2.5. Hidrografía.**

La zona de estudio presenta una extensa red hidrográfica (Figura 2.11), el río principal en el sector uruguayo es el Tacuarembó que desemboca en el Río Negro y que atraviesa los departamentos de Tacuarembó y Rivera, cuya cuenca se extiende más allá de los límites de la zona de estudio. Otro curso de importancia en la zona es el Arroyo Cuñapirú, cuya subcuenca en el departamento de Rivera abarca prácticamente toda la zona aflorante del SAG.

### Cuenca del Río Tacuarembó

La cuenca del Río Tacuarembó forma parte de la Cuenca del Río Uruguay, y abarca un área aproximada de 5500 km<sup>2</sup>, siendo similar en extensión al área aflorante de todo el SAG. Nace en el departamento de Rivera, en la Cuchilla Cuñapirú al Noroeste de Rivera, con cotas de 370 m y su curso, en el tramo superior es paralelo a la Cuchilla Cuñapirú.

El caudal medio anual medido para el período 1971 al 1999 a la altura de Manuel Díaz (intersección Ruta Nacional N° 5) es de 22,02 m<sup>3</sup>/s (Collazo et al., 2005). Esta estación de aforo se encuentra bastante más al sur del sector estudiado en este trabajo.

Los principales afluentes por su margen izquierda son los Arroyos Cuñapirú, Yaguarí y Caragatá, aunque éstos también se encuentran fuera de la zona de estudio.

Por su margen derecha, siempre en el área de estudio, sólo desembocan el Arroyo Aurora y el Zanja Honda. El primero nace en Cuchilla Negra con cotas de 350 m, desembocando en el río Tacuarembó en la localidad de Paso de Ataques con cotas de 160 m. El último nace en la Cuchilla de Cuñapirú y desemboca en el río Tacuarembó con cotas de 140 m en la localidad de Zanja Honda.

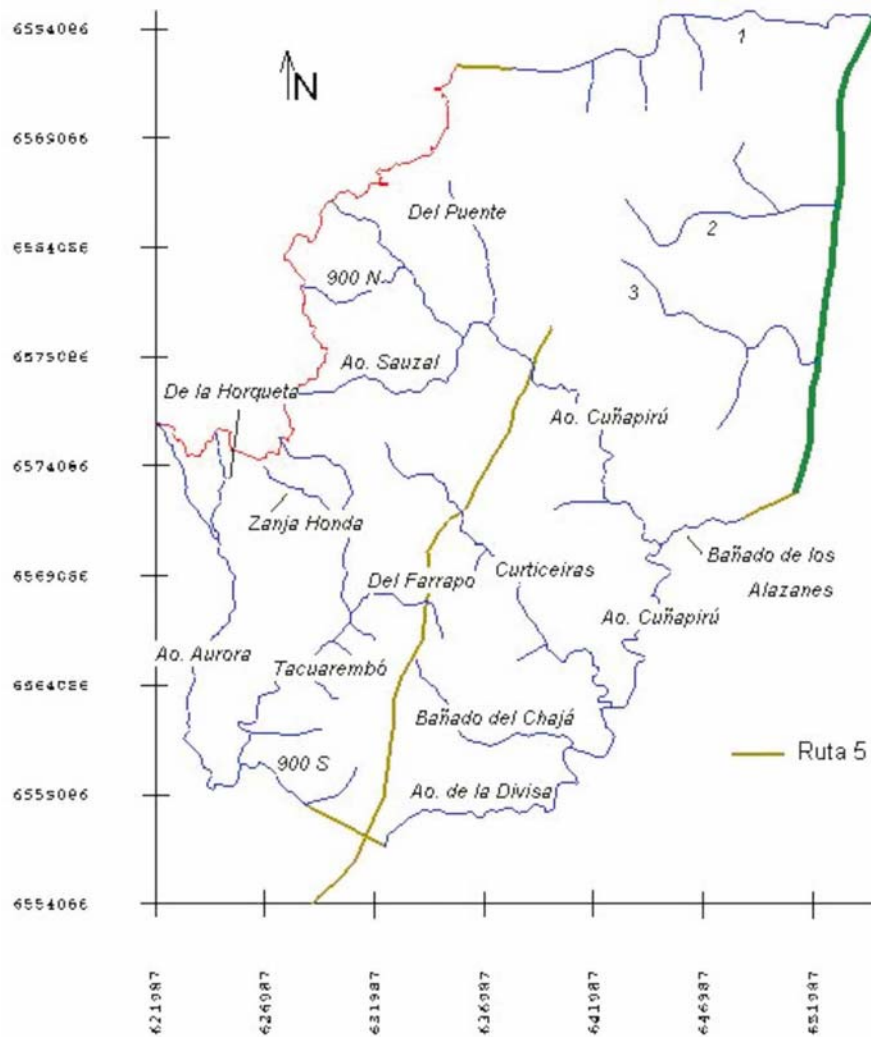


Figura 2.11: Red hidrográfica de la zona de estudio.

### Subcuenca del Arroyo Cuñapirú

Tiene su origen en la Cuchilla Negra, en la localidad de Puntas del Cuñapirú, al Noroeste de la ciudad de Rivera, con cotas de aproximadamente 350 m y desemboca en el Río Tacuarembó a la altura de la localidad de Pueblo del Barro con cota de 150 m.

Su cauce principal tiene una extensión aproximada de 236 kilómetros atravesando los departamentos de Rivera y Tacuarembó. Presenta una pendiente media a lo largo del curso de 0,8 m/km y provee parte del agua potable a la ciudad de Rivera, mediante una represa construida en su curso alto en el Parque Gran Bretaña.

El Arroyo Cuñapirú recibe varios afluentes, entre ellos:



- Arroyo Sauzal: nace en la Cuchilla Negra al Noroeste de la ciudad de Rivera con cotas de 360 m, y desemboca en el Arroyo Cuñapirú a la altura de la localidad de Santa Isabel, con cotas de 200 m. El curso principal tiene una longitud de 11 Km, con una pendiente media de 14,5 m/Km.

- Arroyo del Puente: Tiene su origen en la cuchilla de Santa Ana al Noroeste de la ciudad de Rivera a cotas de 350 m y desemboca a la altura de Paso de la Estiva con cotas de 200 m.

- Arroyo Curticeiras: Con una extensión de 22 kilómetros, el arroyo nace en la localidad de Curticeiras a cotas de 250 m y muere en el Bañado de Chajá con cotas de 160 m. Presenta una pendiente media a lo largo del curso de 4 m/km.

En el sector brasilero, la red de drenaje también pertenece a la cuenca del Río Uruguay, el cual se localiza al noroeste, con dirección de flujo sudoeste. La ciudad de Santana está emplazada al sudoeste de las nacientes del río Quarai, afluente por la margen izquierda del Río Uruguay, en la frontera Uruguayo- Brasileña. Al norte de la ciudad también están las nacientes del Río Ibirapuitã, que escurre con sentido Sur - Norte (<http://www.santanadolivramento.rs.gov.br/dadosgerais.htm>).

Sin embargo, los principales arroyos considerados para este estudio son los arroyos Florentina, Do Salso, y Forno (SAG, 2004), que no son más que arroyos menores, en algunos casos intermitentes que pertenecen a las cuencas y nacientes mencionadas.

## **CAPÍTULO 3**

### **HIDROGEOLOGIA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Como su nombre lo indica, el capítulo está dedicado a un exhaustivo análisis de la hidrogeología del área de estudio. Luego de revisar los antecedentes regionales y locales, se analiza la litología y profundidad de las perforaciones, con énfasis en la identificación de las unidades acuíferas que posteriormente se representarán en el modelo conceptual y numérico. La información de niveles piezométricos obtenida de varias salidas a campo es sintetizada en mapas cronológicos y analizada en un contexto tanto regional como local, identificándose las características esenciales del sistema de flujo subterráneo. Se presenta además la cuantificación del bombeo en las dos ciudades y se resumen los rasgos básicos de la hidrogeoquímica dado que este tema fue tratado extensamente en el informe final del Proyecto del Fondo de Universidades. Finalmente, se revisa toda la información disponible acerca de ensayos de bombeo con el objetivo de acotar los valores de conductividad hidráulica, uno de los parámetros principales en el proceso de la calibración del modelo numérico.

#### **3.1. Antecedentes regionales y locales.**

Existen numerosos antecedentes regionales y locales del SAG que analizan diferentes propiedades del mismo desde diversos puntos de vista, siendo la gran mayoría estudios orientados a la explotación y gestión del recurso hídrico.

Entre los más antiguos, de carácter regional, se encuentran los trabajos netamente geológicos y de exploración de Falconer (1931), Bossi (1966), Fraga y Lisboa (1978), Andreis y Ferrando (1988), ANCAP (1987), De Santa Ana y Verovslasky (1993), entre otros. Respecto a las características hidrogeológicas del sistema acuífero se pueden mencionar los trabajos de Rebouças (1976), Araújo et al. (1999), Kittl Tage (2000), Flores Machado (2005) y Faccini (2006).

Silva Busso (1999) y Oleaga (2002) se cuentan entre los trabajos más detallados, y con aportes novedosos al conocimiento del funcionamiento de este sistema en el sector del SAG que incluye el área de estudio. Ambos autores coinciden en la hipótesis de que en sectores de poco espesor de basalto y con importante fisuración del mismo, la Formación Serra Geral suprayacente es fuente potencial de recarga al SAG de existir conexión hidráulica vertical.

De alcance más local que los dos anteriores, los trabajos de Montañó y Pessi (1985), Montañó y Carrión (1990), Pessi y Hardy (1998), Decoud y Rocha (2000), Pérez y Rocha (2002) brindan información básica de parámetros hidráulicos y niveles de aporte subterráneo.

Otro trabajo reciente en la zona es el de Pacheco (2004), que versa sobre distintos aspectos hidrogeológicos, incluyendo una base de datos de perforaciones, análisis piezométrico local, estimación de la recarga mediante balance hídrico y análisis de perforaciones profundas, entre otros aspectos.

Además del proyecto del Fondo de Universidades que dio marco a esta tesis, en la misma zona de estudio se desarrollaron otros dos proyectos del Fondo. Uno es el denominado “Vulnerabilidad y Riesgo hidrogeológico del SAG en el área aflorante de Rivera, Uruguay” (Collazo et al., 2005). Entre los aportes más relevantes de dicho trabajo se puede mencionar una actualizada caracterización geológica, incorporando información de nuevas perforaciones de Obras Sanitarias del Estado (OSE, Uruguay) y la identificación de una capa centimétrica a decimétrica de arcillas, que actuaría de discontinuidad hidráulica en el paquete sedimentario arenoso, separándolo en Formación Rivera (miembro superior) y Formación Tacuarembó (miembro inferior). El otro es el proyecto denominado “Caracterización de áreas de recarga y descarga del SAG en Rivera - Livramento y Quaraí - Artigas”, donde se llevaron a cabo estudios isotópicos, geofísicos, de hidroquímica y piezométricos (Bessouat, 2005).

Por su parte, Collazo (2006) mejoró y amplió el trabajo del proyecto del Fondo de Universidades en su tesis doctoral, brindando lineamientos básicos para la gestión y el mejor aprovechamiento del recurso subterráneo en la zona aflorante del SAG basándose en una exhaustiva caracterización hidrogeológica de las dos unidades principales.

En resumen, el Sistema Acuífero Guaraní está constituido por sedimentos Jurásicos y Cretácicos, representados por las Formaciones Cuchilla Ombú, Tacuarembó y Rivera, evidenciando ambientes de sedimentación fluviales y eólicos. La Formación Cuchilla Ombú constituye el piso del acuífero y por dicho motivo no se analizó en este trabajo.

Si bien la información estratigráfica disponible dificultó la definición de espesores, puede decirse que la Formación Tacuarembó (sedimentos fluviales) presenta espesores que rondan de los 50 a los 100 m, mientras que la Formación Rivera (sedimentos eólicos) tiene un espesor medio de 65 m (Collazo, 2006).

### **3.2. Información básica disponible.**

La información base tales como perfiles estratigráficos, piezometría, georreferenciación, ensayos de bombeo, análisis de muestras de agua, caudales de explotación y otros, se recopiló de empresas perforistas, consorcios locales de empresas y cooperativas interesadas en el recurso hídrico, organismos gerenciantes del servicio de agua potable de ambas ciudades, como ser Obras Sanitarias del Estado (OSE) en Rivera y Departamento de Aguas e Esgotos (DAE) en Santana do Livramento. La Base de Datos Hidrogeológicos (BDH) del Proyecto SAG constituyó otra fuente de información. También se recurrió a la base de datos de perforaciones disponible en Internet confeccionada por la Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM, Brasil) en convenio con instituciones de Canadá ([www.siagas.cprm.gov.br](http://www.siagas.cprm.gov.br)).

La información topográfica de toda el área de estudio se obtuvo de la web a través de las imágenes Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://seamless.usgs.gov>). Además, se contó con la cartografía del Uruguay en formato digital a escala 1:50.000 elaborada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas de ese país.

Por otro lado, en el marco del proyecto del Fondo de Universidades (Rodríguez et al., 2006), se realizó, entre septiembre de 2004 y diciembre de 2005, una intensa actividad de campo con diversos objetivos: reconocimiento del terreno, búsqueda de información, entrevistas con actores locales en particular perforistas, relevamiento planialtimétrico de perforaciones, documentación fotográfica, toma de muestras de agua, relevamiento piezométrico actualizado, clasificación de suelos, georreferenciación de puntos de control, entre otros. En el Anexo I se describen cada una de las siete salidas a campo con las principales actividades realizadas

En total se georreferenciaron 53 perforaciones con precisión centimétrica, se midió el nivel piezométrico en 30 de ellas y se tomaron 25 muestras de agua para su posterior análisis químico.

Específicamente, en cuanto a los datos piezométricos en el sector brasilero se trabajó con la información disponible en un estudio hidrológico de 1995 proporcionado por DAE (Santana do Livramento), donde se relevaron 123 perforaciones. Se contó con datos de tipo de pozo, profundidad, caudales, niveles estático y dinámico, aunque no de todas las perforaciones. También se obtuvieron datos más recientes proporcionados por DAE, principalmente referidos a caudales de explotación.

La información utilizada en el sector uruguayo estuvo compuesta por los datos aportados por la empresa de perforaciones Tecnoagua y el consorcio Tecnoagua-Coperpoa, los datos obtenidos en el programa PRENADER del Ministerio de Ganadería,

Agricultura y Pesca, los estudios y perforaciones propiedad de la Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE), los datos de la Dirección Nacional de Hidrografía del Ministerio de Transportes y Obras Públicas y la información litológica de perforaciones provista por OSE.

Además de la información indicada, se contó con datos de piezometría del proyecto del Fondo de Universidades titulado “Vulnerabilidad y riesgo hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en el área aflorante de Rivera, Uruguay”. El acotamiento y posicionamiento de los pozos de dicho proyecto no presentan la misma precisión que los relevados dentro del proyecto de Rodríguez et al. (2006), sin embargo fueron útiles para generar un marco regional de la piezometría en el área de estudio. Algunos de los pozos indicados coinciden en ambos proyectos.

En el Anexo II – Tabla 1 se incluye el listado de todas las perforaciones relevadas en Rivera y Santana do Livramento.

### **3.3. Litología y profundidad de las perforaciones.**

En el área próxima a las ciudades de Rivera y Santana do Livramento las areniscas aflorantes están caracterizadas por la presencia de agua subterránea en un primer nivel de aporte ubicado entre los 10 y 20 m de profundidad en las zonas de altura media. La disponibilidad de agua cercana a la superficie y la facilidad de perforación por métodos de percusión manuales que brindan las areniscas, han motivado que los pozos en las zonas suburbanas sean perforados por empresas informales. El esquema de perforación utilizado para los pozos de abastecimiento familiar o pequeños emprendimientos es el de entubado en los primeros metros (no más de 10 m), continuando a pozo desnudo hasta alcanzar el primer nivel de aporte.

La Figura 3.1 muestra el histograma de frecuencia de profundidades de las perforaciones en el sector brasilero, construido en base a datos de 101 pozos. El 43% de ellos corresponde a pozos someros, con profundidades menores a 20 m. No obstante, un 21 % de las perforaciones posee una profundidad superior a los 100 m aunque no todas ellas cuentan con descripción estratigráfica.

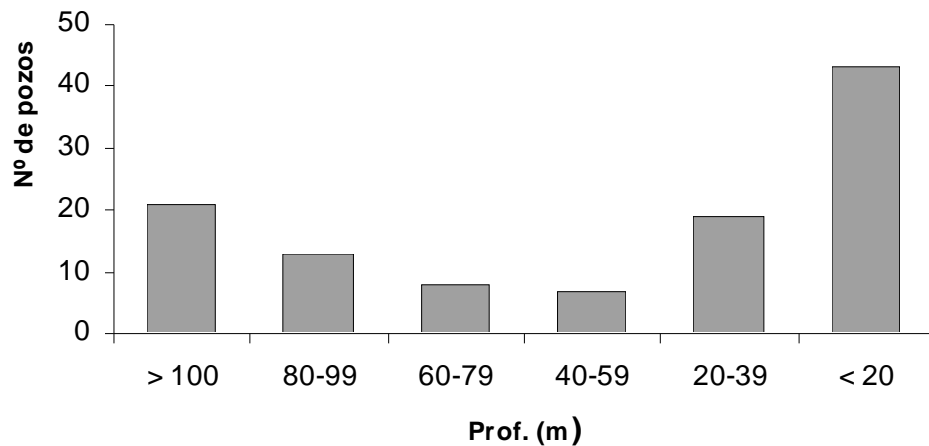


Figura 3.1: Histograma de frecuencia de profundidades de las perforaciones en el sector brasilero.

En el sector uruguayo se contó con información de algo más de 100 perforaciones, 43 de las cuales tenían datos de profundidad (Figura 3.2). De estas últimas el 30% corresponde a pozos someros mientras que el 16,3% posee profundidades mayores a 100 m. Dado que no existe una base de datos sistematizada es posible que muchos pozos, particularmente los de menor profundidad, no estén incluidos en las cifras anteriores.

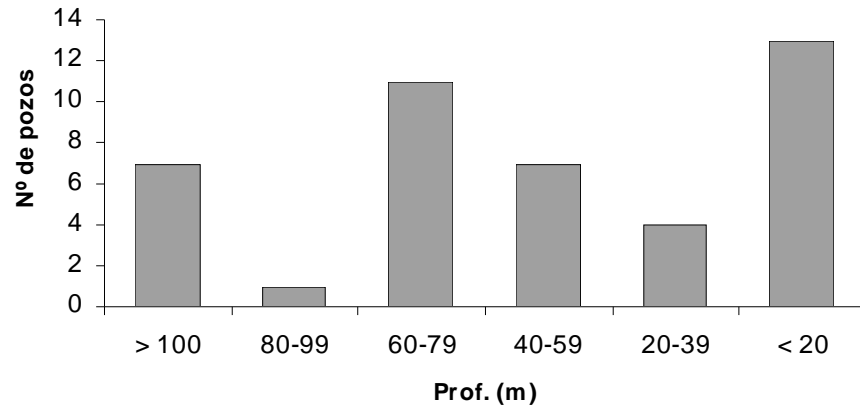


Figura 3.2: Histograma de frecuencia de profundidades de las perforaciones en el sector uruguayo.

En la Figura 3.3 se muestran las únicas perforaciones del área de estudio que poseen información litológica con diferente grado de detalle (aproximadamente unas 90).

La Figura 3.4 muestra con mayor detalle los nombres de las perforaciones y su ubicación. Por simplicidad y falta de información más detallada sólo se consideraron el basalto, el paquete de areniscas dividido en dos capas (somera y profunda), sin distinguir entre Formación Rivera y Tacuarembó, y una unidad semiconfinante entre ambas de limitada extensión areal. El gran número de pozos someros y el escasísimo número de pozos que penetran tanto los basaltos como las areniscas, hacen dificultosa la definición de espesores para la posterior modelación del sector. Pacheco (2004) reportó un mapa de isopacas de la Formación Tacuarembó para la Cuenca Norte. La zona de estudio es atravesada por la curva de 100 m, en dirección noreste-suroeste.



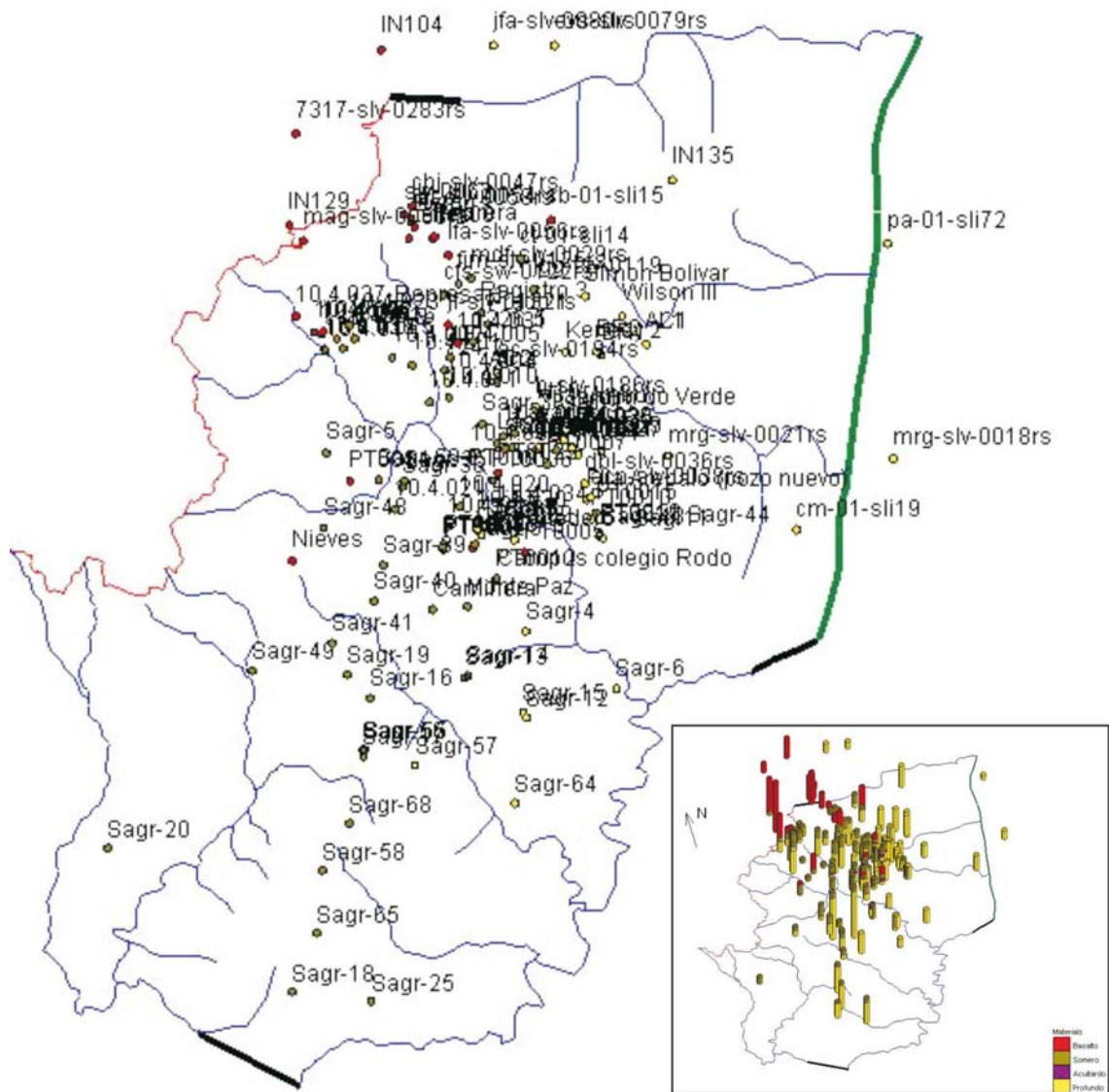


Figura 3.3: Ubicación en planta de las perforaciones consideradas, junto a un mapa esquemático en perspectiva con los perfiles litológicos de las perforaciones. Notar la importante cantidad de pozos poco profundos que existen en la zona. Se superpone la hidrografía del sector modelado.

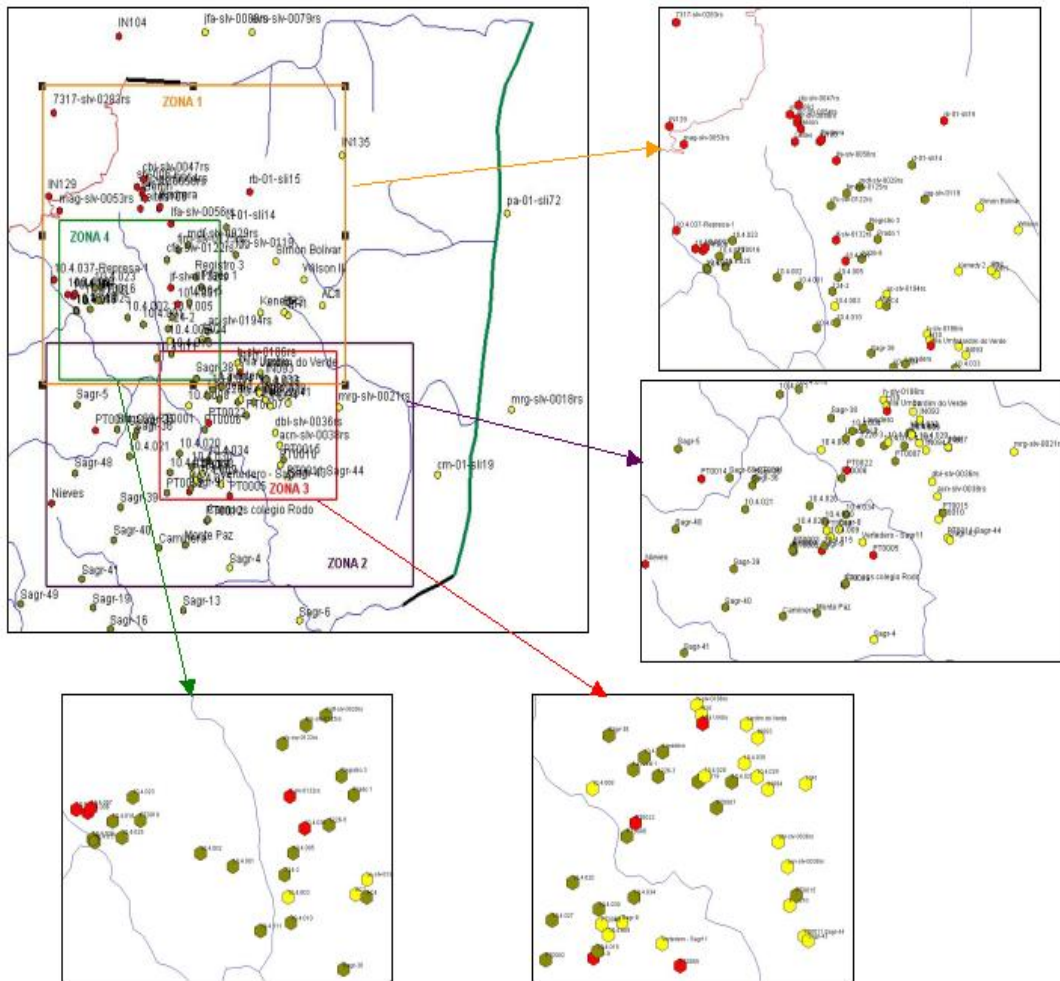


Figura 3.4: Detalle por zonas de la ubicación en planta de las perforaciones consideradas en el estudio, principalmente en el entorno a la planta urbana donde se encuentra la mayor densidad.

### 3.4. Mapas piezométricos.

Oleaga (2002a) analizó la piezometría regional del Acuífero Guaraní en el centro oeste de Uruguay utilizando información recolectada durante los años 2000 y 2001. La Figura 3.5 presenta las curvas equipotenciales resultantes. Dicho mapa potenciométrico indica un flujo regional en sentido NE-SO, con los mayores niveles potenciométricos en el este, siendo ésta la zona de recarga mientras que hacia el oeste se ubica una zona de tránsito o descarga por extracción. El gradiente hidráulico reportado por Montañó y Carrión (1990) para la zona este, en las cercanías del área de estudio, es del orden de  $7 \times 10^{-4}$ .

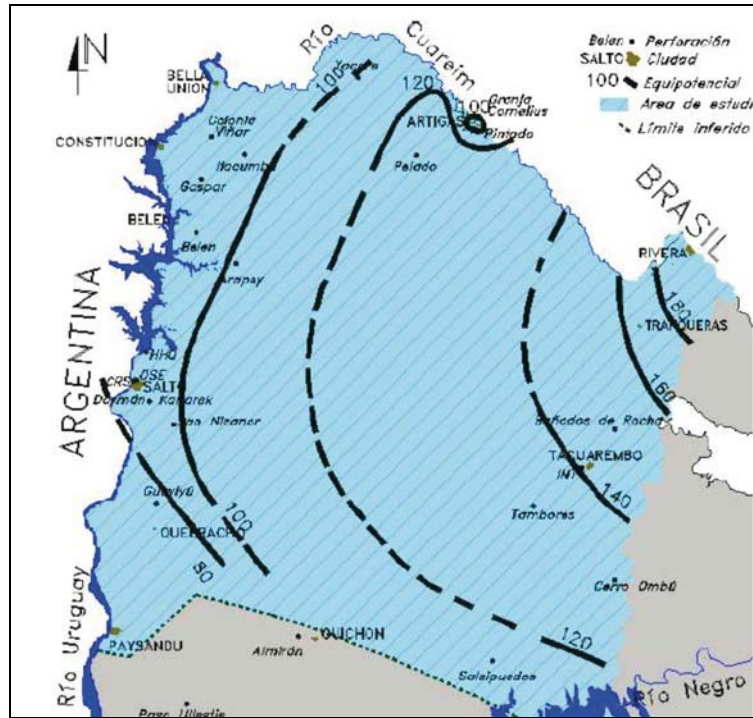


Figura 3.5: Piezometría regional años 2000 – 2001 (Oleaga, 2002a).

La Figura 3.6 muestra la piezometría del año 2002 construida utilizando niveles dinámicos reportados por OSE, para la cual no se cuenta con los datos digitales, desconociéndose el método y criterio utilizados para el trazado de isopiezas. Nótese el carácter netamente local del análisis en comparación con el mapa de la Figura 3.5. De todas maneras se aprecia que el bombeo modificó el flujo regional en el sector de estudio, con gradientes del orden del 15 % en los sectores de mayor extracción.

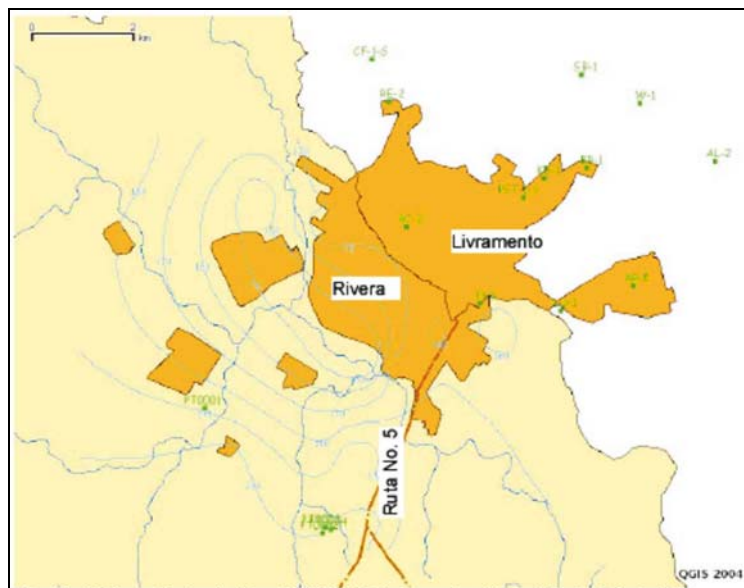


Figura 3.6: Piezometría del área de Rivera en el año 2002 realizada por OSE (Pérez y Rocha, 2002).

En la salida a campo de noviembre de 2004 se midieron niveles piezométricos conjuntamente con el acotamiento satelital con precisión centimétrica de pozos seleccionados (Anexo II, Tabla 2) (Rodríguez et al., 2006), encontrándose importantes diferencias de nivel hidráulico e hidroquímicas en pozos cercanos. Estas diferencias pueden atribuirse tanto a las características constructivas de los pozos como al comportamiento diferencial entre pozos “profundos” (> 35 m) y pozos “someros” (< 35 m) según los clasificó Pacheco (2004), de los cuales los primeros usualmente presentaban varios niveles de aporte mientras que los someros sólo uno.

En la Figura 3.7 se presentan los datos relevados por distintos autores en forma cronológica, entre noviembre de 2004 y diciembre de 2005, sin clasificar según la formación a la que pertenecen. La Figura 3.7.a muestra la baja cantidad de datos de buena precisión correspondientes a pozos profundos en dicha campaña de medición. El gradiente hidráulico en el sureste de la zona estimado por Pacheco (2004) es  $8 \times 10^{-3}$ . Los mayores gradientes en el noroeste presentan una gran incertidumbre dado que se trata de una zona con importantes carencias de información.

El acotamiento geodésico de agosto de 2005 junto a los datos de noviembre de 2004 permitió contar con 53 pozos con posicionamiento planialtimétrico de precisión centimétrica (Anexo II - Tabla 3). Debido principalmente a los regímenes de explotación de una parte importante de los pozos acotados, no fue posible la determinación de un nivel estático, por lo cual sólo se dispuso de aproximadamente 30 pozos monitoreados. A pesar de ello, el acotamiento en aquellos pozos en explotación a partir de los datos históricos permitió calcular el nivel estático en el momento de su construcción. Por lo indicado, el análisis piezométrico correspondiente a agosto de 2005 se basó únicamente en aquellas perforaciones con acotamiento geodésico, y cuya captación se correspondía con el sistema de flujo más

profundo, de tipo regional. La Figura 3.7.b muestra los pozos medidos durante la campaña de agosto de 2005.

La diferencia de nivel en aquellas perforaciones en que se realizaron mediciones en nov/04 y ago/05 fue muy pequeña, lo que indicaría aparentemente una escasa variación temporal de niveles piezométricos en dichos períodos. El análisis de la información de ambas campañas permitió observar un sistema de flujo en dirección noreste en la parte sur del complejo Rivera - Santana, mientras que en el norte el flujo se desplaza en dirección sur-sureste.

Además, se identificó que el nivel hidráulico en aquellos pozos “someros” siempre se encuentra por encima de la superficie potenciométrica para dicho lugar, lo cual es indicativo de una dirección de flujo descendente, confirmando la presunción de recarga vertical entre los distintos niveles.

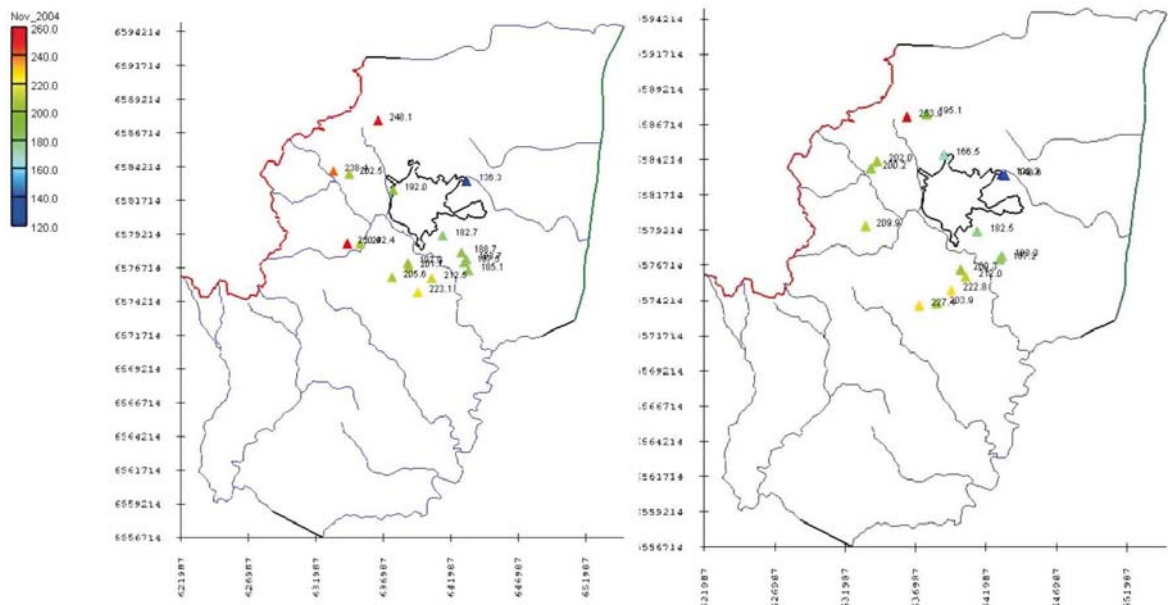
En principio, para noviembre de 2004, se indicó la existencia de una zona de mayores descensos en la parte de Santana do Livramento hacia la cual conducirían las líneas de flujo. La adición de algunos pozos de OSE al monitoreo de agosto de 2005 permitió una mejor definición de la superficie piezométrica en el sector uruguayo de mayor extracción. Esto puso en evidencia el efecto del bombeo, ya que en la piezometría se observa una zona de menor cota potenciométrica que coincide con el parque de perforaciones de OSE, tanto el del Parque Gran Bretaña (al noroeste del área de estudio) como el que se encuentra entre éste y la ciudad de Rivera.

Las menores cotas piezométricas se encuentran en el sector brasilero, con un mínimo de 136,3 m, lo que puede resultar de la combinación de la magnitud de las extracciones y de la topografía del terreno. En el sector de Rivera se midieron niveles con cotas de 180 m cerca de la frontera, hasta 212 m hacia el sur de la ciudad. En el sector oeste y noroeste se monitorearon dos pozos ubicados en basaltos, que explotan

exclusivamente esta formación, su cota piezométrica fue superior a 250 m. En las cercanías de uno de esos pozos se midió el nivel en una perforación en areniscas con un valor de 202,4 m. Esto indicaría la existencia de un apreciable gradiente vertical que, de existir conectividad hidráulica dentro de las vulcanitas fisuradas, podría producir un flujo vertical descendente, esto es, recarga desde los basaltos hacia las areniscas.

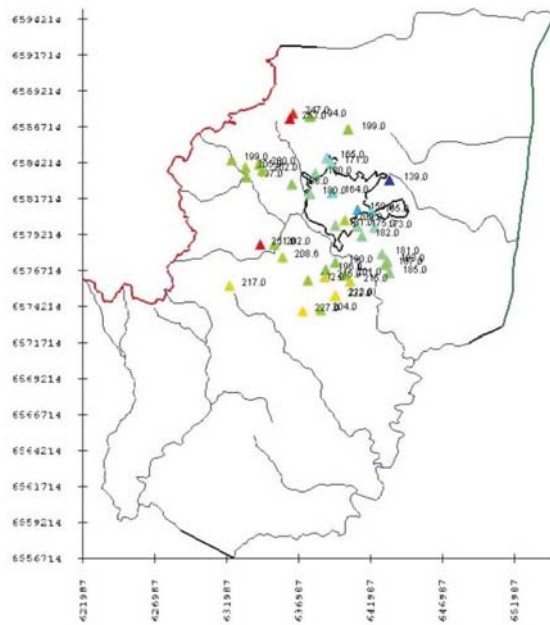
La información recopilada y la generada en el marco del proyecto del Fondo permitió desarrollar un esquema preliminar de funcionamiento del acuífero que fue usado como base de la última campaña de monitoreo en diciembre de 2005 (Anexo II – Tabla 4). Dada la diferencia piezométrica existente entre los pozos en basaltos y los pozos que extraen agua de estratos someros del SAG, y de éstos con los pozos que explotan el estrato profundo, se planteó el objetivo de reforzar en esa campaña la información en cada grupo de pozos. Además, se buscó trabajar con mayor cantidad de perforaciones que explotaran un único nivel hidráulico. En ocasiones se tomaron pozos que explotan dos niveles, pero su inclusión se debió a su adecuada descripción litológica y su ubicación. Los datos se presentan en la Figura 3.7.c.

La Figura 3.7.d muestra los datos piezométricos suministrados por el proyecto del Fondo de Universidades “Vulnerabilidad y riesgo hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en el área aflorante de Rivera, Uruguay”, solicitados para completar la información en las zonas con carencia de datos, principalmente al sur de la localidad de Rivera.

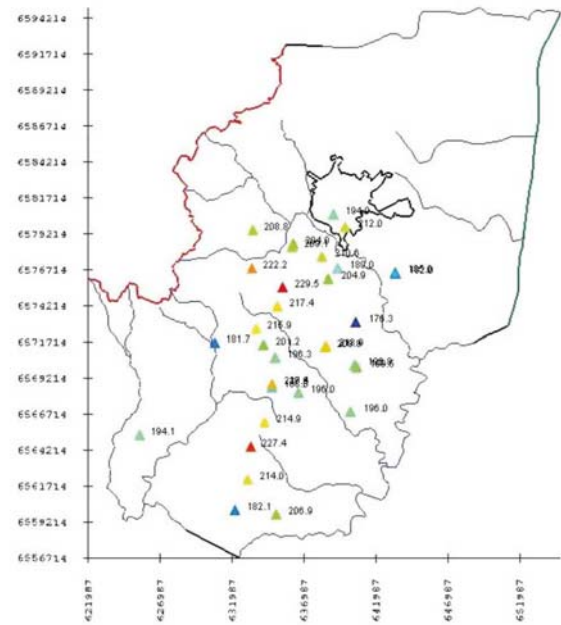


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 3.7: Información de niveles piezométricos actualizada. a) noviembre 2004 (Pacheco, 2004); b) agosto 2005 (Rodríguez et al., 2006); c) diciembre 2005 (Rodríguez et al., 2006) y d) Collazo et al. (2005).

Toda la información piezométrica disponible se muestra en la Figura 3.8.a. En los casos de pozos medidos en más de una oportunidad, se consideró el nivel del último relevamiento efectuado. Los niveles fueron luego clasificados en forma aproximada

dependiendo a qué capa perteneciera el pozo monitoreado. Los pozos del nivel profundo que sirvieron de base para la calibración del modelo numérico se encuentran en la Figura 3.8.b, y los del nivel somero en la Figura 3.8.c.

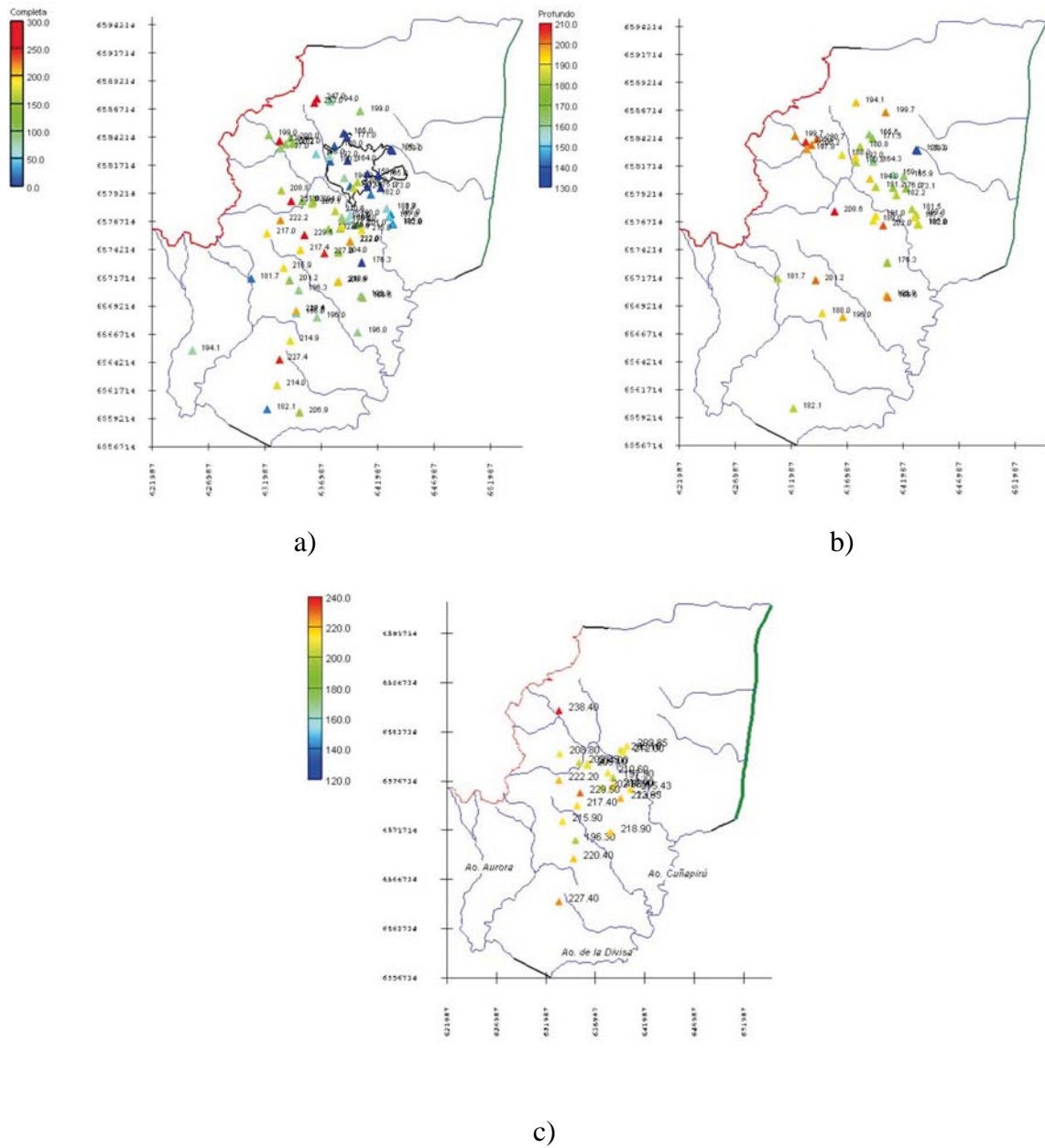


Figura 3.8: a) Datos piezométricos completos. b) Datos piezométricos correspondientes al nivel acuífero profundo. c) Datos piezométricos correspondientes al nivel acuífero somero.



A continuación se presentan la piezometría del acuífero somero y del acuífero profundo en las Figuras 3.9 y 3.10, respectivamente. Las curvas piezométricas se trazaron a partir de los datos puntuales más actuales relevados de las figuras anteriores. La identificación de los patrones de flujo se realiza en la sección siguiente.

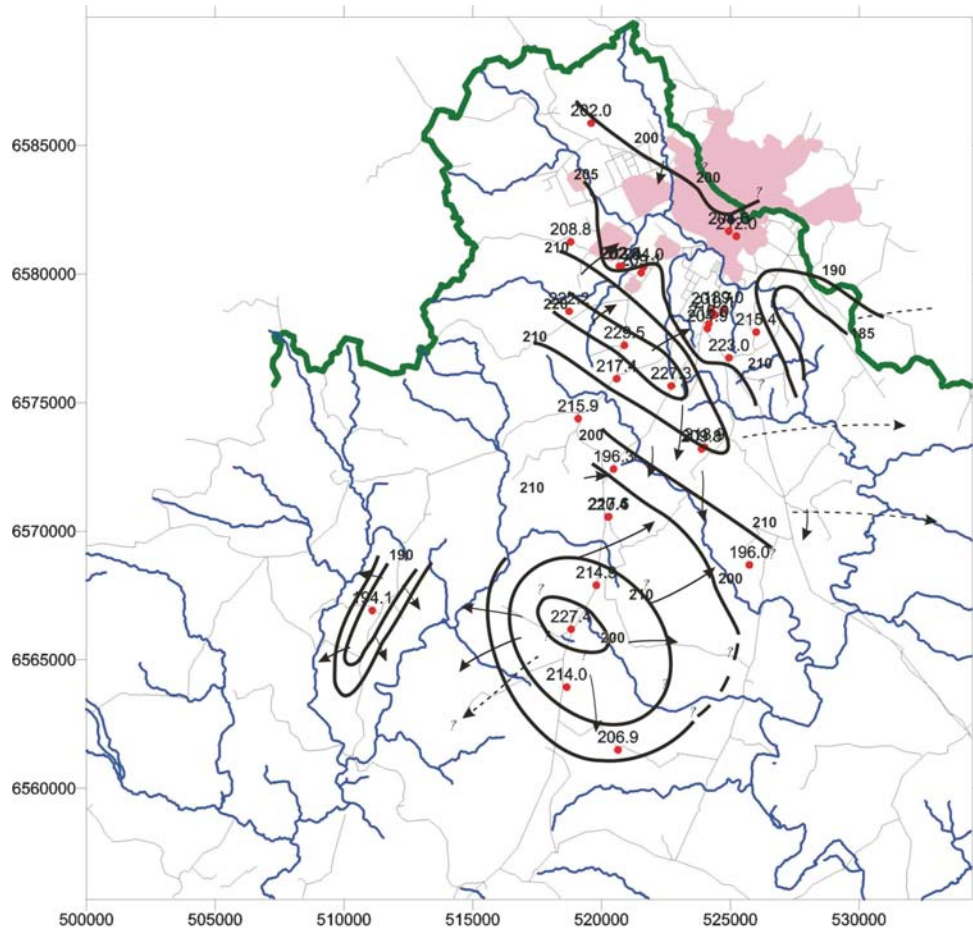


Figura 3.9: Piezometría del acuífero somero en diciembre 2005 (Rodríguez et al., 2006)

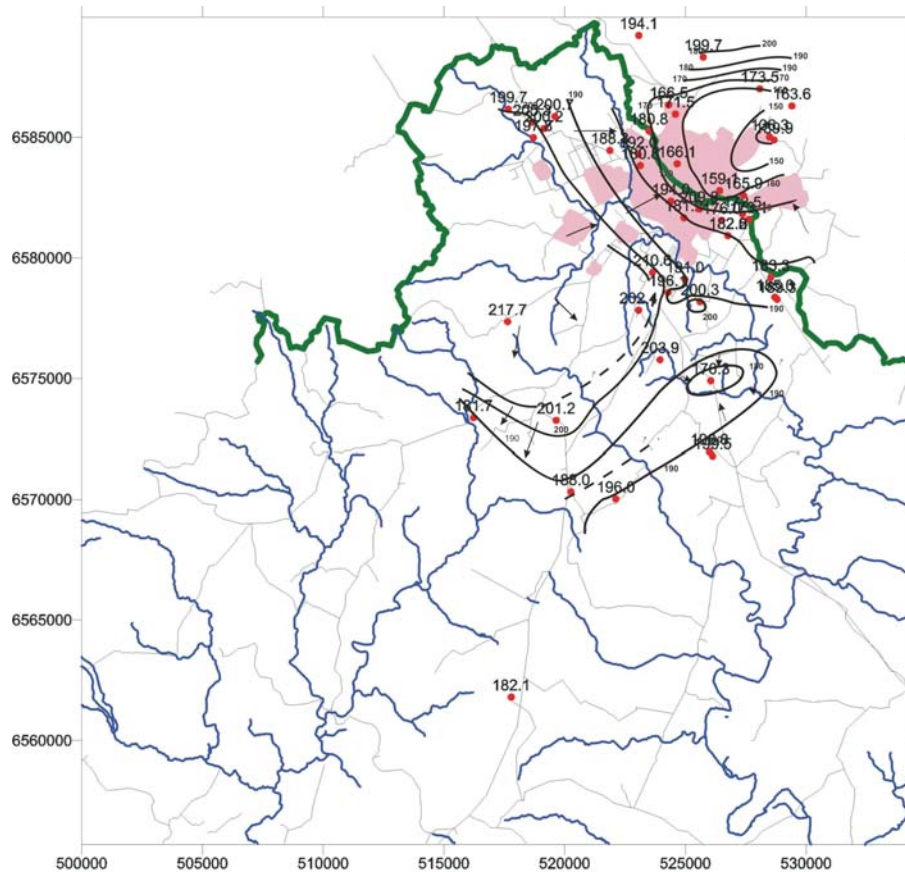


Figura 3.10: Piezometría del acuífero profundo en diciembre 2005 (Rodríguez et al., 2006).

### 3.5. Niveles y direcciones de flujo.

El análisis de toda la información antecedente y generada en el proyecto del Fondo de Universidades (Rodríguez et al., 2006) permitió identificar en la zona de estudio tres niveles hidráulicos bien diferenciados, los cuales pueden tener intercambio de flujo entre sí. Se observó un nivel de agua en basaltos por encima del nivel hidráulico del sector somero del acuífero Guaraní, con diferencias de nivel muy importantes, de más de decenas de metros. En particular, en el pozo de Antonio Rodríguez (PT0005) que explota tanto las fisuras del basalto como las areniscas, se detectó un flujo vertical descendente ya que podía escucharse el agua caer dentro del pozo desde sectores del basalto hacia la parte profunda, donde se alcanzan las areniscas. El intercambio de flujo en este caso se debe a que la

perforación es una vía preferencial de recarga al acuífero Guaraní, desconociéndose si en condiciones naturales el basalto es fuente de recarga.

La información piezométrica obtenida en pozos en basaltos no es suficiente para definir direcciones de flujo, sólo pudiéndose indicar que el agua tiene potencial suficiente para ser fuente de recarga a las areniscas.

Respecto de los dos sectores más permeables del SAG, se observa que el superior siempre presenta niveles por encima del inferior, apoyando la hipótesis de recarga y flujo descendente. Esta diferencia entre niveles se puede ejemplificar en los pozos de la panadería La Ideal (Rivera), donde dos pozos separados cuatro metros presentan 23,6 m de diferencia piezométrica. El que explota los primeros metros de las areniscas presenta el nivel de agua a 12,6 m de profundidad, mientras que el que explota sólo el sector profundo por debajo de una franja poco permeable tiene el nivel de agua a 36,2 m de profundidad.

En los pozos poco profundos, que sólo explotan el sector somero del SAG, la información es muy escasa y sólo permite estimar direcciones de flujo pero no realizar una piezometría ajustada de toda el área. Esto se debe a que este sector no estaría presente en toda el área de estudio, ubicándose básicamente en el lado uruguayo, y en menor proporción, en la parte brasileña más alta cercana a la frontera. Los datos piezométricos muestran que las líneas de flujo del lado uruguayo son hacia el Arroyo Cuñapirú (ver Figura 3.9), y en los puntos cercanos con información los niveles hidráulicos del arroyo y del acuífero son próximos, lo cual permite indicar que este curso sería la descarga natural del sector somero en la zona de Rivera. Del lado brasileño no existen datos de perforaciones que exploten este sector somero del SAG infiriendo que desaparece en esta dirección.

El acuífero “profundo” es el que tiene mayor espesor y se extiende a ambos lados de la frontera. Este acuífero es la principal fuente de agua de Rivera – Santana do

Livramento, ya que en él se ubican los pozos de extracción de agua para abastecimiento público con mayores caudales de explotación.

La piezometría obtenida (Figura 3.10) muestra una dirección de flujo mayormente hacia Brasil, detectándose dos sectores con importantes descensos producto del bombeo, uno en el campo de bombeo de OSE y el otro en uno de los centros de perforaciones de abastecimiento que DAE tiene dispersos por la ciudad de Santana do Livramento.

A partir de esta piezometría no se pueden identificar sitios de descarga natural, por lo que este acuífero tiene carácter más regional y menos influenciado por el régimen hídrico superficial.

La dirección de flujo es mayormente NE en el lado Uruguayo, con un gradiente de  $3.5 \times 10^{-4}$  en dirección de la frontera. En la frontera noroeste se observa un flujo Oeste – Este con un gradiente levemente mayor  $5 \times 10^{-4}$ , mientras que al norte se observa un flujo SSE en dirección de Santana con un gradiente de aproximadamente  $1 \times 10^{-2}$ , posiblemente influido por el intenso bombeo hacia la ciudad.

### **3.6. Explotación del SAG. Caudales de bombeo y específicos.**

Según los datos disponibles (Anexo II - Tabla 5) en el sector brasilero los caudales específicos presentan un valor máximo de  $7,8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , mientras que en el sector uruguayo se estimó un valor máximo de  $5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  (Montaño y Carrión,1990). En aquellas perforaciones que cuentan con valores de caudales actualizados, se aprecia que en general son menores o iguales a los de diseño.

Con referencia a la cantidad de agua extraída, se analizó su evolución histórica aproximada utilizando los caudales de diseño para las perforaciones que no presentaban valores actualizados, los que por lo dicho anteriormente, pueden sobreestimar el bombeo actual. Además los datos utilizados corresponden a las perforaciones de OSE y DAE, no

incluyéndose el bombeo de pozos particulares, esto podría llegar a compensar en parte la sobreestimación derivada del uso de los caudales de diseño en lugar de los caudales actuales.

La Figura 3.11 muestra que hasta la década del 80 la explotación en Rivera llegaba a 930 m<sup>3</sup>/d, valor que evolucionó notablemente hasta situarse en aproximadamente 13.000 m<sup>3</sup>/d al inicio de la presente década, con un incremento importante a partir del quinquenio 1996-2000. Al año 2002, la capacidad de bombeo instalada era de 21.335 m<sup>3</sup>/d, para una población de poco más de 60.000 habitantes. En algunas de estas perforaciones se contaba con datos de caudal y horas diarias de bombeo, mientras que en otros casos se conocía sólo el caudal horario actual. En Rivera se pudo diferenciar entre el caudal de diseño y el caudal real de bombeo, aunque en forma aproximada.

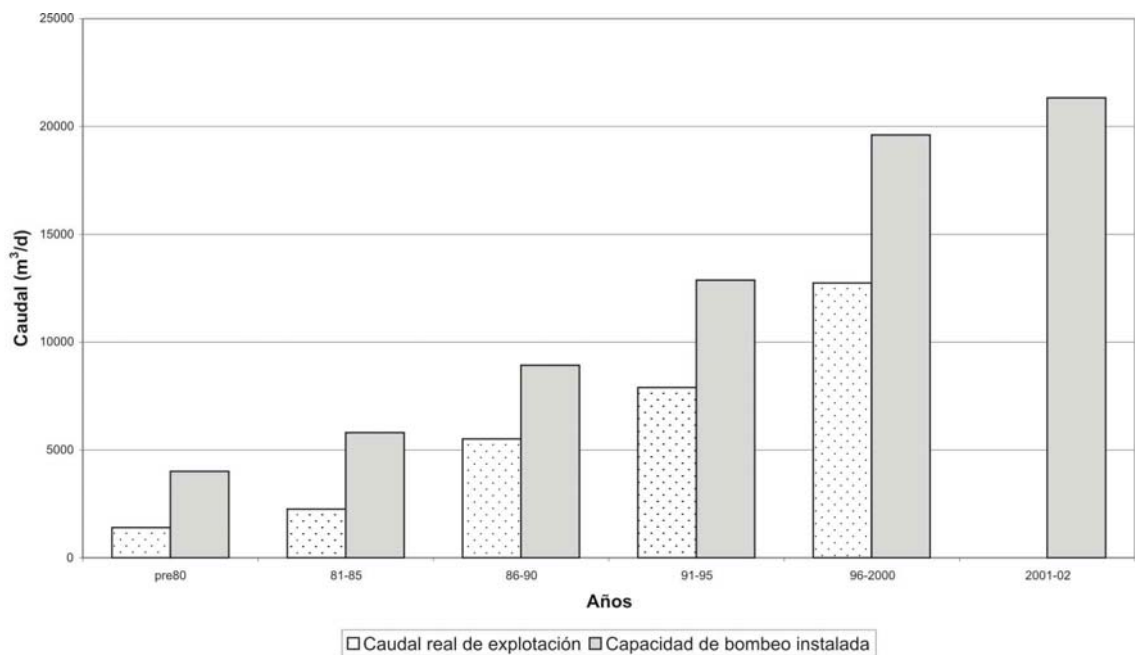


Figura 3.11: Explotación para la ciudad de Rivera.

La Figura 3.12 presenta la explotación de la localidad de Santana do Livramento construida utilizando los caudales de diseño. Por un lado los caudales diarios están sobreestimados dado que se desconocen las horas efectivas de bombeo, por otro lado se han subestimado puesto que no se incluyó la totalidad de pozos por falta de información

sea de caudal o año de puesta en funcionamiento del pozo. Se desconoce también si los pozos más antiguos están aún en funcionamiento. Teniendo en cuenta las falencias apuntadas, en la figura se aprecia que a partir de 1985 la capacidad de bombeo instalada sufrió un importante incremento. En el año 1995, ese valor llegaba a 36.972 m<sup>3</sup>/d, aunque lamentablemente no se dispone de valores más actualizados.

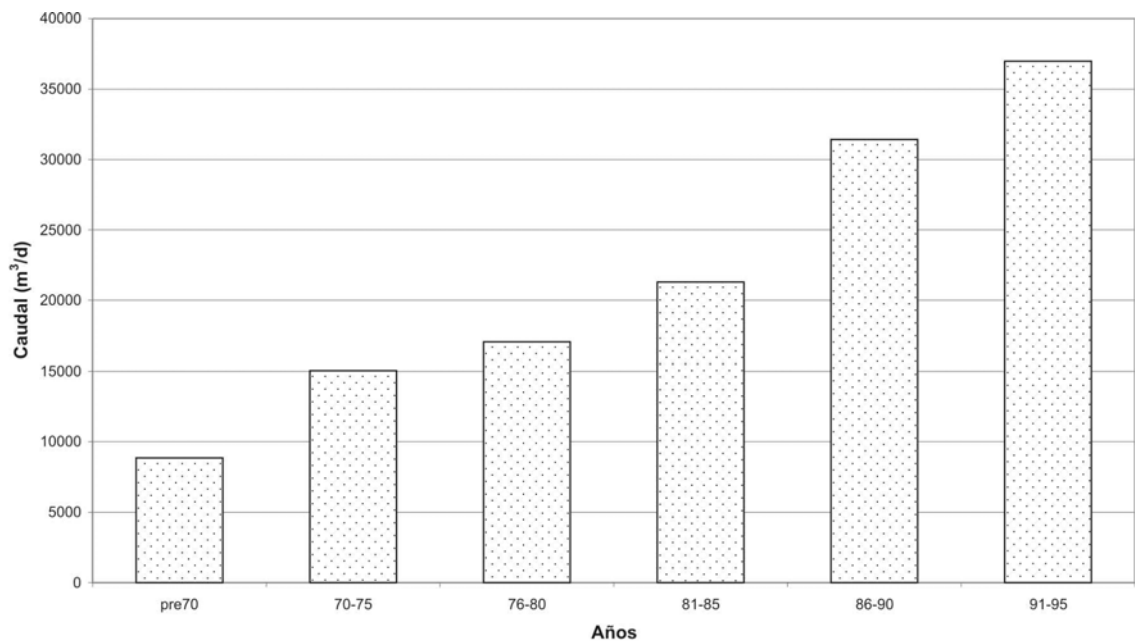


Figura 3.12: Explotación para la ciudad de Santana do Livramento.

### 3.7. Parámetros hidráulicos. Análisis de ensayos de bombeo.

Respecto a la conductividad hidráulica se reinterpretaron los ensayos de bombeo y de recuperación disponibles, tanto de pozos de la localidad de Rivera como de Santana do Livramento con el objetivo de contar con más información detallada para la calibración del modelo numérico.

En total se analizaron 24 perforaciones (17 de Rivera y 7 de Santana), no disponiéndose de información en el resto del área de estudio. En la mayoría de los casos los ensayos fueron realizados en el momento de la construcción del pozo. Sólo en dos pozos del sector brasileiro, Registro 3 y AC2, se pudieron realizar ensayos de recuperación

durante los relevamientos de campo del proyecto. Del resto, en 11 casos se contó tanto con ensayo de bombeo como de recuperación, mientras que en los demás sólo con ensayos de bombeo.

En ambos tipos de ensayo, la transmisividad se estimó mediante el método de Theis. La conductividad hidráulica se calculó dividiendo transmisividad por la longitud de filtros instalados. En los casos que no se contaba con dicha información se utilizó la información disponible de pozos cercanos.

Algunos ensayos se realizaron en el momento de la construcción del pozo con el objetivo de determinar su caudal de explotación, los caudales de ensayo fueron en aumento. El criterio que se siguió fue utilizar el último caudal informado, de modo que se pueden estar subestimando los valores de transmisividad obtenidos. En otros casos, dicho caudal disminuyó, probablemente por un agotamiento propio del pozo, el criterio fue similar al caso anterior pero teniendo en cuenta que aquí se puede estar sobreestimando el resultado.

La Figura 3.13 muestra los valores de conductividad hidráulica calculados, indicados junto al nombre del pozo respectivo. Estos sirvieron de estimación previa para la elección de las propiedades hidrogeológicas de las capas del modelo numérico. En la Tabla 3.1 se brinda la misma información más los valores de transmisividad.

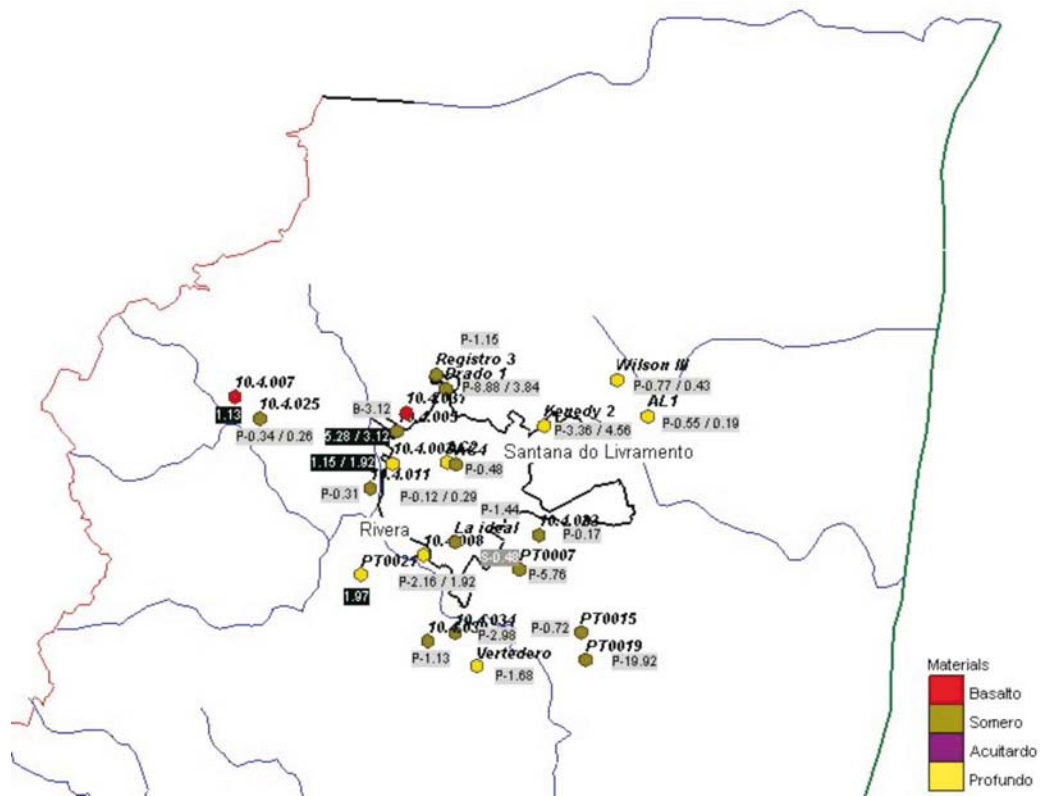


Figura 3.13: Conductividad hidráulica (en m/d). Los valores que tienen una P pertenecen al nivel profundo, la S al nivel somero, y la B a basaltos. Los que no tienen letra no pueden asociarse a uno u otro nivel.

Los valores de permeabilidad estimados para el sector profundo presentan un promedio de 1,5 m/d, con un máximo de 5,76 m/d y un mínimo de 0,12 m/d. Respecto al sector somero el único valor de K estimado fue de 0,48 m/d, mientras que en basalto también se contó con una sola estimación que resultó en 3,12 m/d.

En aquellos pozos en que se contó con ambos ensayos, los valores de K resultantes fueron del mismo orden de magnitud. El valor disponible en acuífero somero (Pozo La ideal) arrojó valores de transmisividad muy por debajo de los valores reportados para la Formación Rivera, y aún por debajo de los reportados para la Formación Tacuarembó. Los valores estimados en el acuífero profundo, en general concuerdan con estimaciones previas reportadas en la literatura o son menores a ellas (Montaño y Pessi, 1985; Montaño et al., 1998; Pessi y Hardy, 1998; Pacheco, 2004). Un compendio de dicha información se presenta en la Tabla 3.2.



Tabla 3.1: Valores calculados de conductividad hidráulica a partir de ensayos de bombeo y de recuperación

Pozo	T - bombeo (m <sup>2</sup> /d)	T - recuperación (m <sup>2</sup> /d)	Espesor de filtros, b (m)	K - bombeo (m/d)	k - Recuperación (m/d)	Capa
PT0015	4.32		6.00	0.72		P
PT0021	19.68		10.00	1.97		s/d
Registro 3		40.53	35.18		1.15	P
AC2		14.40	30.00		0.48	P
La ideal	11.52		24.00	0.48		S
La ideal	36.00		25.00	1.44		P
10.4.031	87.05		27.90	3.12		B
10.4.033	6.55	6.55	39.00	0.17	0.17	P
10.4.003	44.52	74.21	38.65	1.15	1.92	s/d
10.4.005	125.45	74.13	23.76	5.28	3.12	s/d
10.4.008	51.84	46.08	24.00	2.16	1.92	P
10.4.011	7.49	7.49	24.00	0.31	0.31	P
PT0007	57.60		10.00	5.76		P
PT0019	119.52		6.00	19.92		P
Vertedero	16.80		10.00	1.68		P
10.4.026	3.02	2.38	9.00	0.34	0.26	P
kennedy 2	60.48	82.08	18.00	3.36	4.56	P
AL1	16.56	5.76	30.00	0.55	0.19	P
10.4.034	23.81		8.00	2.98		P
Wilson 3	27.99	15.75	36.45	0.77	0.43	P
AC4	3.60	8.64	30.00	0.12	0.29	P
Prado 1	393.38	170.11	44.30	8.88	3.84	P
10.4.007	27.30		24.20	1.13		s/d
10.4.030	13.54		12.00	1.13		P

B: Basaltos - P: Profundo – S: Somero.

Tabla 3.2: Parámetros hidráulicos de las Formaciones Rivera y Tacuarembó

Formación	Fuente	T (m <sup>2</sup> /d)	S
Rivera	Montaño y Pessi (1985)	139-151	
	Montaño et al. (1998)	140-155	
	Pessi y Hardy (1998)	242-300	2,5 x 10 <sup>-4</sup>
	Pacheco (2004)	147	
Tacuarembó	Montaño y Pessi (1985)	27-57	
	Montaño et al (1998)	25	
	Pessi y Hardy (1998)	70-120	0,5 – 1,5 x 10 <sup>-3</sup>
	Pacheco (2004)	60	

### **3.8. Hidrogeoquímica.**

Respecto a la caracterización hidrogeoquímica se presenta aquí un resumen de las conclusiones más relevantes del proyecto del Fondo, marco de esta tesis. Un mayor detalle y análisis se encuentran en Rodríguez et al. (2006).

Como resultado de los muestreos realizados por Rodríguez et al.(2006) las aguas se pudieron clasificar en general como Bicarbonatadas–Cálcicas, excepto en los pozos PT0001, PT0002 y PT0008, que son Bicarbonatadas–Magnesianas. Los autores observaron diferencias químicas importantes entre los pozos situados en areniscas y los pozos situados en basalto o próximos a estos materiales.

El análisis hidrogeoquímico permitió diferenciar las muestras de agua en cuatro grandes grupos de acuerdo con los pozos de donde se extrajeron: A) exclusivamente del basalto; B) del sector más somero de las areniscas; C) del sector más profundo de las areniscas y D) del sector más somero de las areniscas pero muy cerca de la cresta basáltica.

La relación entre Na-Cl (Figura 3.14) muestra que el grupo A presenta concentraciones de sodio de más del doble que el resto y valores bajos de cloruros. El grupo B muestra muy bajas concentraciones de ambos elementos, con valores muy próximos al agua de lluvia, mientras que el grupo D se encuentra en una posición intermedia. La relación entre Ca-Mg permite apoyar dicha separación, mostrando que los pozos con agua de basaltos o cercanos muestran enriquecimiento en magnesio, mientras que los pozos que se encuentran alejados del basalto contienen bajos valores, incrementándose el contenido de calcio con respecto al magnesio a medida que se avanza en dirección del flujo.

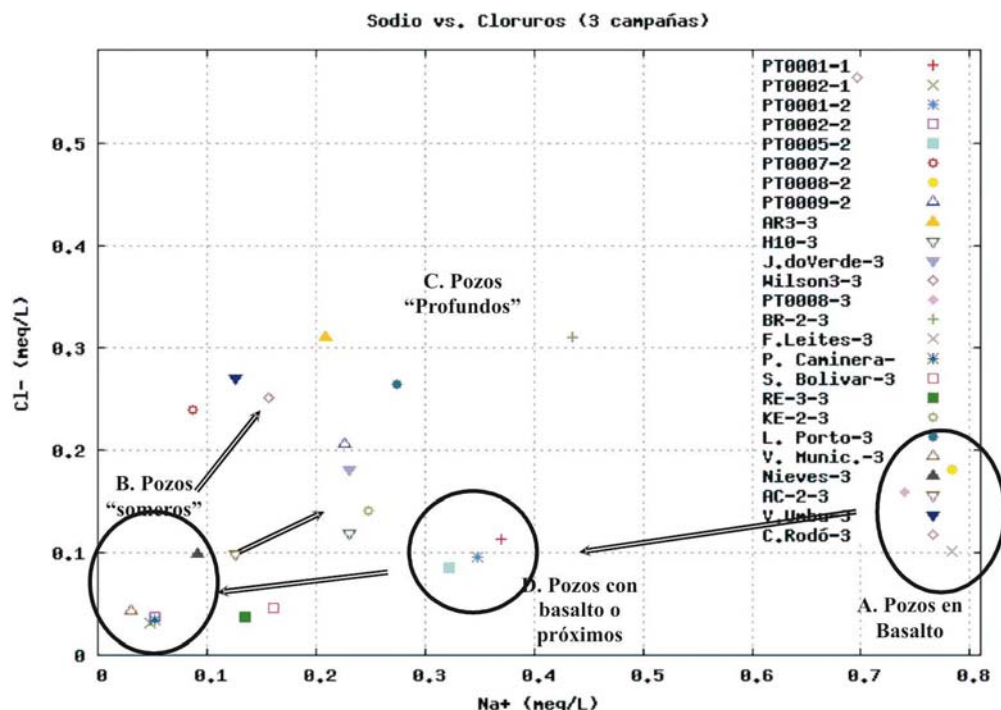


Figura 3.14: Concentraciones de Na vs. Cl.

Las aguas del basalto presentan los mayores valores de conductividad eléctrica y pH (Figura 3.15), reduciéndose cuando reciben recarga de agua de lluvia. Esto evidencia que al avanzar en la dirección de flujo en el acuífero somero el volumen de agua de lluvia que lo recarga, diluye la recargada a través de basaltos. A medida que el flujo comienza a descender y alcanzar sectores más profundos que no reciben recarga directa comienza a subir tanto el pH como la conductividad eléctrica, mostrando una evolución hidroquímica usual.

Del análisis conjunto de la piezometría y la química, se puede inferir que el agua que recarga en basaltos circula en dirección de las ciudades, recibiendo en las areniscas recarga de muy baja salinidad. El agua que fluye en dirección de las zonas topográficamente más bajas (Ej. Arroyo Cuñapirú) va disminuyendo su pH y conductividad eléctrica al recibir la recarga de la precipitación, alcanzándose valores de pH entre 5 y 6 con conductividades tan bajas como 100 a 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos valores son muy similares al agua de lluvia y evidencian la escasa capacidad buffer y de modificación de

la calidad del agua. A medida que el agua descende al acuífero profundo comienza a incrementar su contenido iónico.

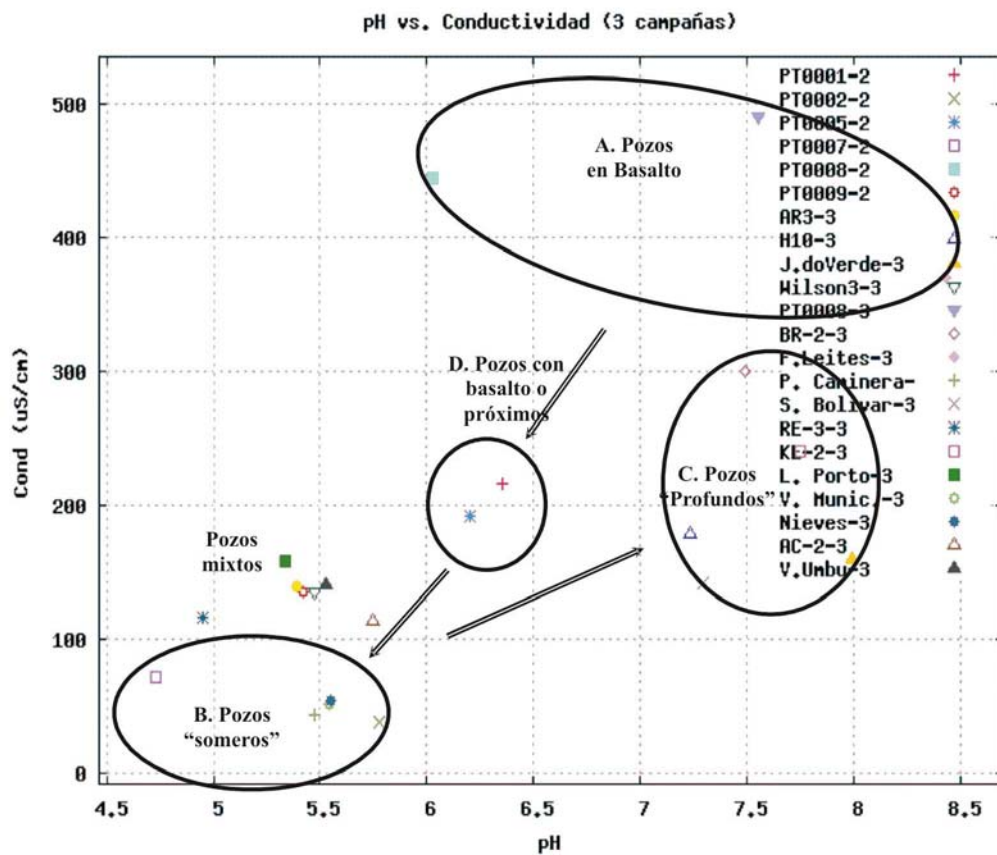


Figura 3.15: Relación entre especies medidas en campo, pH vs. Conductividad.

La información hidroquímica de las diferentes campañas realizadas por Rodríguez et al.(2006) conjuntamente con la información antecedente, permitió inferir que no existen variaciones temporales en la hidroquímica de la zona.

## **CAPITULO 4**

### **ESTIMACIÓN DE LA RECARGA**

Se denomina recarga a la porción de agua que efectivamente alcanza los mantos acuíferos y contribuye al almacenamiento de los mismos (Custodio y Llamas, 1979). La tasa de recarga es una magnitud clave en cualquier estudio hidrogeológico debido a que constituye el límite superior de agua que puede ser extraído de un acuífero sin causar el agotamiento del recurso.

En el proceso de recarga se pueden distinguir dos mecanismos dominantes (Vries et al., 2002; Scanlon et al., 2002):

1) La recarga directa, que es el agua derivada de la precipitación o de la irrigación que alcanza el acuífero luego de ser abastecidos los requerimientos de déficit de humedad del suelo y de evapotranspiración, es decir el agua que está en exceso en el sistema superficial; y

2) La recarga indirecta, que proviene de la percolación concentrada desde el fondo de cuerpos de agua superficiales como ser lagos o ríos; o a través de fracturas o fallas de rocas semipermeables suprayacentes.

Este capítulo se refiere exclusivamente a la estimación de la recarga directa, aunque más adelante en la sección de la modelación numérica se calculará una recarga integrada, ya que se considerará, además, la recarga a través de formaciones fisuradas confinantes.

#### **4.1. Antecedentes de estimaciones en la zona.**

Diferentes autores estimaron la recarga en las areniscas aflorantes de Rivera - Santana do Livramento. Montañó y Carrión (1990) calcularon un valor global para toda el área aflorante del SAG (3700 km<sup>2</sup>), asumiendo una precipitación media de 1300 mm/año y una infiltración del 3%, lo que resulta en  $1,44 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/año, esto es una tasa de 39 mm/año. Silva Busso (1999) obtuvo un valor del 3,5 % de la precipitación media como tasa de

recarga. Pérez y Rocha (2002) realizaron un análisis cualitativo de la recarga en la zona de Rivera, puntualizando la incidencia del cordón de cerros en el incremento de la recarga debido a las grandes pendientes que originan concentraciones de flujo. Recientemente, Pacheco (2004) implementó un sencillo balance hídrico considerando como área “ejemplo” de recarga un sector comprendido entre las curvas piezométricas de 170 m y 190 m, delimitada lateralmente por dos líneas de corriente, con un valor resultante de 50,2 mm/año, esto es 3,6 % de la precipitación media del área, estimada en 1400 mm/año.

En resumen, independientemente del método y el área elegidos, las estimaciones antes mencionadas arrojan valores de recarga entre el 3 y el 5% de la precipitación media anual.

Sin embargo, recientemente Collazo (2006) implementó un balance hídrico para el sector aflorante del SAG en los departamentos Rivera y Tacuarembó (zona norte de Uruguay), calculando una tasa de recarga de aproximadamente 340 mm/año, o lo que es lo mismo un 20 % de la precipitación media anual en la Estación Rivera para la serie 1961 – 2000 (1617 mm/año). Dicho balance hídrico se implementó en base a tres objetivos: a nivel edáfico, para determinar la Evapotranspiración Real, los excedentes y déficit hídricos, siguiendo la metodología de Thornthwaite y Matter (1957); a nivel global para resolver la ecuación del ciclo hidrológico y a nivel subterráneo, para establecer las entradas y salidas del SAG.

#### **4.2. Revisión de metodologías de estimación de la recarga.**

Con el objetivo de analizar diferentes métodos de estimación de recarga, tanto a través de medios porosos como de medios fracturados, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de métodos de cálculo para luego proponer cuáles de ellos podrían adaptarse y aplicarse al caso en estudio.

La recarga es un parámetro muy variable, tanto espacial como temporalmente, y

medirla directamente en el campo es una tarea complicada. Como denominador común toda la literatura consultada aconseja aplicar más de un método de estimación a fin de conocer el orden de magnitud de los errores asociados a cada uno de los mismos, ya que están basados en diferentes hipótesis que simplifican el análisis. De esta forma se obtiene como resultado un rango acotado de valores de tasas de recarga para el medio en estudio.

La Tabla 4.1 presenta un resumen de las metodologías disponibles para medios porosos. Los diferentes métodos se aplican en función de las escalas temporales y espaciales que dominan el proceso en análisis. En este sentido se pueden distinguir tres aproximaciones diferenciadas: los estudios basados en información del sistema superficial, de la zona no saturada (ZNS) y de la zona saturada (ZS). En los dos primeros casos los valores que se obtienen son estimaciones de la *recarga potencial* que podría alcanzar el sistema subterráneo, es decir del agua que infiltra y que eventualmente puede o no llegar a la superficie freática del acuífero. En el caso de los estudios en la ZS se obtienen tasas de *recarga real*, es decir la que efectivamente alcanza los reservorios subterráneos.

Dentro de cada uno de estos tres puntos de vista se encuentran técnicas basadas en mediciones físicas, en el comportamiento de trazadores conservativos e isotópicos, y en métodos de modelación numérica. Un análisis más detallado de estas metodologías escapa a los objetivos de esta tesis, el lector interesado puede referirse a los trabajos de Vries et al. (2002) y Scanlon et al. (2002), entre otros.

De todas las metodologías revisadas, las más factibles de aplicar en este trabajo son el balance hídrico, el balance de isótopos, el análisis de fluctuaciones del nivel freático y los modelos numéricos. Esta última es la alternativa que presenta mayores ventajas debido a que, si bien los resultados son función de la calidad y cantidad de datos disponibles, posee un grado de flexibilidad mayor y un dominio espacial de la información, en contraposición al resto que sólo permite un dominio puntual o local.

El análisis preliminar de la información disponible hizo descartar los estudios de trazadores debido a la complejidad propia del sistema (por la posible existencia de caminos preferenciales del flujo); a que dicho estudio sólo permite identificar fuentes de recarga y no estimar sus tasas; y al elevado costo que tienen los ensayos analíticos (Scanlon et al. 2002). El balance de cloruros y el análisis de la fluctuación de niveles freáticos también fueron descartados debido a la carencia de información histórica de niveles piezométricos, de concentraciones de cloruros en agua y de la correcta estimación del parámetro de rendimiento específico del sistema.

En definitiva sólo se implementó el balance hídrico y un modelo numérico. En este capítulo se describe la aplicación del balance hídrico de tipo convencional, para lo cual debieron estimarse las salidas del sistema tales como evaporación, flujo superficial y flujo subterráneo hacia zonas vecinas; y las entradas, tales como precipitación, y flujo superficial/subterráneo desde zonas vecinas.



Tabla 4.1: Metodologías disponibles para la estimación de la recarga en medios porosos.

Metodología	Variantes	Hipótesis de trabajo	Ventajas	Desventajas	Escala temporal / espacial	Bibliografía
<b>Determinaciones de campo</b>	Infiltrómetros - tensiómetros - lisímetros.	Mediciones de velocidades y tasas de infiltración.	Mediciones directas	Datos puntuales de la ZNS.	Diaria u horaria. A escala local.	Scanlon et al., 2002
<b>Balance Hídrico</b>	Aplicable al sistema superficial, ZNS y ZS.	Recarga uniforme para el área, calculada como el valor residual de la sumatoria de las componentes del ciclo hidrológico	Flexibilidad	Depende de la incertidumbre en las mediciones del resto de los parámetros involucrados.	Amplios rangos, aunque al estar basado en datos climáticos tiene una limitación de 100 años, aproximadamente.	Pompêo 2000, Rushton et al., 1979, Scanlon et al., 2002.
<b>Análisis de fluctuaciones del Nivel Freático (NF)</b>	Exclusivamente análisis de la ZS.	Válido para acuíferos libres, menos apropiado en acuíferos fracturados y semi-confinados.	Estimaciones a largo plazo (cambio climático). Datos de la ZS.	NF muy variables en el tiempo. Los valores de rendimiento específico de acuíferos (Sy) son difíciles de estimar.	Mensual/ anual	Healy et al., 2002.
<b>Isótopos</b>	Diversos elementos: 3H - O <sup>18</sup> - He - C <sup>14</sup> ZS	Análisis hidroquímicos	Fácil de implementar, requiere solo una campaña de muestreo, muy preciso.	Informa fuentes pero no es tan útil para cuantificar. Elevados costos.	Rangos amplios.	Wood et al., 1997.

Nota: Para todas las técnicas, las estimaciones tanto desde la zona superficial como desde la Zona No Saturada (ZNS) son de recarga potencial, mientras que desde la Zona Saturada (ZS) son de la recarga real que llega al nivel freático.

Tabla 4.1: Metodologías disponibles para la estimación de la recarga en medios porosos (continuación).

<b>Método</b>	<b>Variantes de cada método</b>	<b>Hipótesis de trabajo</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Escala temporal / espacial</b>	<b>Bibliografía</b>
<b>Balance de Cloruros (Cl<sup>-</sup>)</b>	ZNS y ZS.	Los Cl <sup>-</sup> provienen solo de la precipitación. Son conservativos, el flujo de masa no ha cambiado durante el tiempo y no hay recirculación de Cl <sup>-</sup> en el sistema.	Bajo costo. Propiedades integradas en el tiempo.	Las concentraciones de Cl <sup>-</sup> en la ZNS son mucho menores que en la ZS porque hay dilución en la extracción de muestras.	Amplia	Wood 1999, Wood et al., 1997.
<b>Separación de componentes del hidrograma</b>	Filtros digitales - curva de recesión - medias móviles.	Recarga uniforme sobre la cuenca. Se necesitan valores de caudales diarios.	Fácil de implementar si se cuenta con buena información hidrológica.	Se dificulta separar el flujo base cuando hay almacenamientos en bancos o zonas intermedias.	Evento de tormenta. Amplios rangos espaciales, ZS.	Arnold & Allen 1999, Hannula et al., 2003, Halford & Mayer 2000.
<b>Sensoramiento Remoto</b>	Microondas, infrarrojo, visible - radares - radiómetros	Mediciones de humedad del suelo, cobertura vegetal, fisiografía.	Complemento de otros estudios. Microondas se pueden usar con nubes. Producto de dominio público.	Sólo aplicable para acuíferos libres, integrando datos de ZNS y ZS.	Amplia	Jackson 2002.
<b>Modelos numéricos</b>	Elementos Finitos. Diferencias Finitas.	Basados en conservación de la masa.	Validación de modelos conceptuales, predicción, análisis de sensibilidad.	La precisión depende del ajuste de los diversos parámetros	Amplios Rangos, ZNS y ZS.	Standford 2002.

### 4.3. Datos disponibles.

Se contó con datos meteorológicos de dos fuentes. Por un lado, se utilizaron los datos medidos en la Estación Rivera, de la Dirección Nacional de Meteorología del Uruguay: precipitaciones diarias para la serie 1971 – 2002; precipitaciones mensuales para la serie 1914 – 1997; y temperaturas mensuales para la serie 1960 – 1999. Estos datos se denominarán “puntuales”.

Por otro lado se trabajó con datos de precipitación y temperatura mensuales para el período 1901 – 2002, obtenidos de la base de datos de CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, Inglaterra), cedidos por el Dr. Norberto García (FICH, UNL). Dichos datos son sintéticos y fueron estimados a partir de una red global de estaciones meteorológicas, para puntos de grilla espaciados 5° entre sí. En este caso se utilizaron los datos del punto 30° 15' latitud sur, y 55° 15' longitud oeste, por ser el más cercano a las localidades de Rivera y Santana do Livramento. En adelante se denominará a esta serie como los datos “de grilla”.

La Tabla 4.2 resume los datos meteorológicos disponibles y utilizados en el cálculo de balance hídrico.

Tabla 4.2. Datos meteorológicos disponibles

	<b>Datos puntuales</b>		<b>Datos de grilla</b>	
	<b>Diarios</b>	<b>Mensuales</b>	<b>Diarios</b>	<b>Mensuales</b>
<b>Precipitación</b>	1971-2002	1914-1997	-	1901-2002
<b>Temperatura</b>	-	1960-1999	-	1901-2002
<b>Evaporación tanque</b>	-	1979-1999 (en Artigas)	-	Estimados con Penman

La primera etapa de procesamiento de la información consistió en analizar los estadísticos de ambos conjuntos de datos, como puede observarse en la Tabla 4.3. Los estadísticos de las series de temperatura son muy similares, mientras que difieren notoriamente para la precipitación. Respecto a esta variable también se obtuvo una varianza y una amplitud entre el valor máximo y mínimo mucho mayores para la serie de datos puntuales mostrando el efecto de suavizado con el que cuenta la serie de datos de grilla

respecto de los valores reales.

Tabla 4.3: Estadísticos de las series de datos puntuales y de grilla.

Parámetro estadístico	Precipitación mensual 1914 - 1997 (mm/año)		Temperatura mensual 1960 - 1999 (°C)	
	Puntuales	Grilla	Puntuales	Grilla
Promedio	123	128,9	18,2	19,1
Máximo	943	610,6	26,6	27,4
Mínimo	0	7,2	9,4	10,4
Varianza	8644,6	5834,5	19,2	18,7

Ambas series se contrastaron gráficamente, asumiendo a los datos puntuales como los verdaderos. En el caso de la precipitación se utilizaron los datos que se superponen en el tiempo, es decir desde 1914 a 1997 para la serie mensual (Figura 4.1) y para la serie anual (Figura 4.2). Con el objetivo de clarificar las tendencias también se graficaron los últimos 30 años (1967 – 1997) para precipitación mensual y anual (Figuras 4.3 y 4.4, respectivamente).

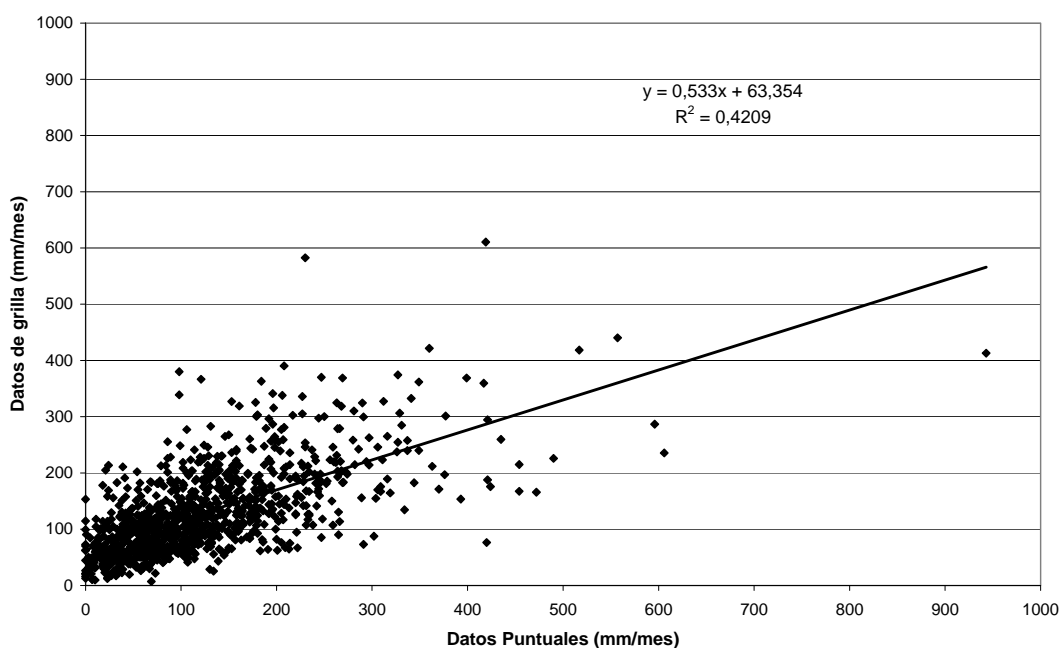


Figura 4.1: Comparación de los datos de precipitación mensual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1914 - 1997.

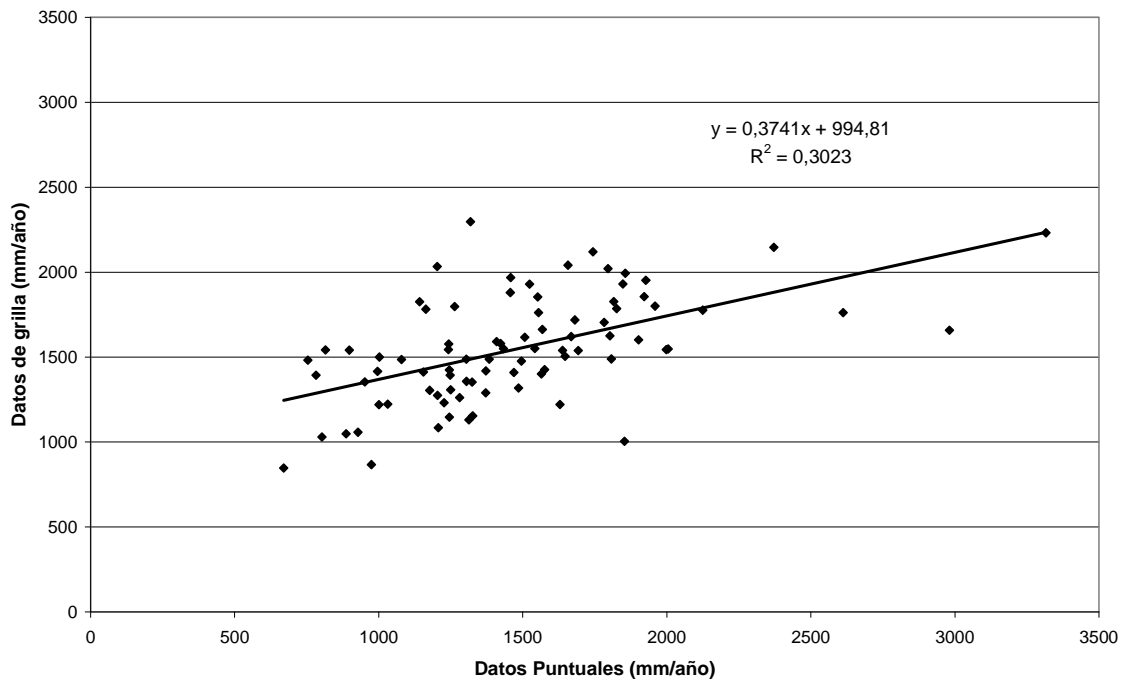


Figura 4.2: Comparación de los datos de precipitación anual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1914 - 1997.

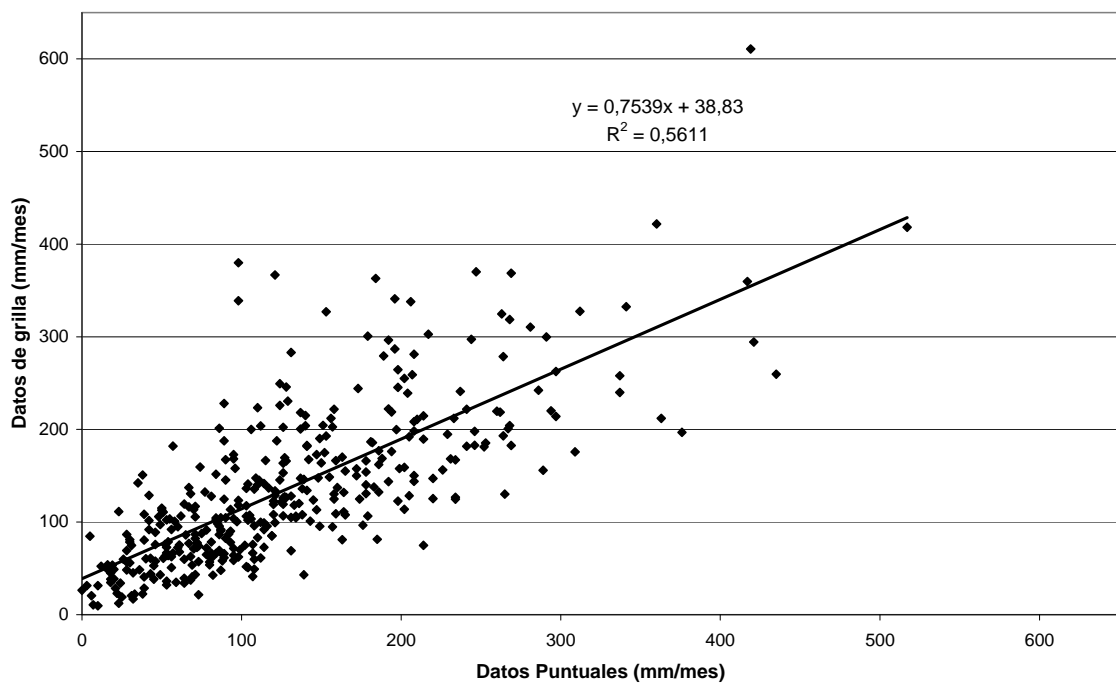


Figura 4.3: Comparación de los datos de precipitación mensual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1967-1997.

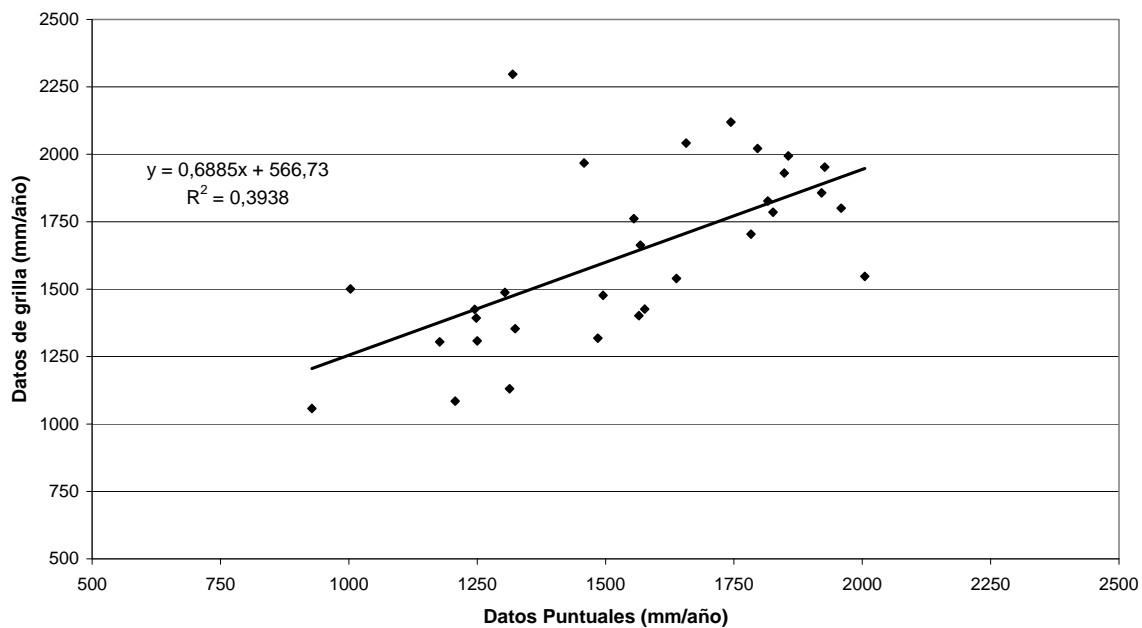


Figura 4.4: Comparación de los datos de precipitación anual para las series de datos puntuales y de grilla, período 1967-1997.

En los valores de precipitación es notable el efecto de suavizado que produce la información obtenida de la grilla. Por ejemplo nótese en la Figura 4.1 que, de acuerdo a la regresión lineal, los valores de grilla (y) son aproximadamente iguales a la mitad de los valores puntuales (x), más la ordenada al origen.

Para los datos de temperatura se realizó un contraste similar para la serie superpuesta (1960 - 1999) (Figura 4.5).

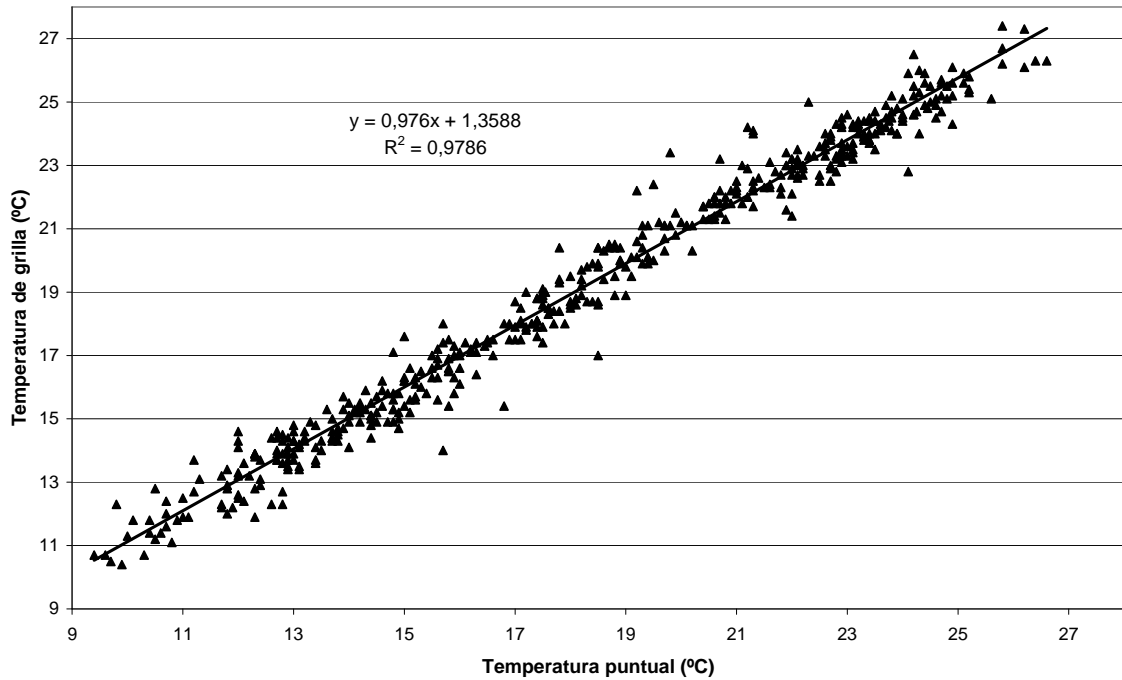


Figura 4.5: Comparación de los datos de temperatura promedio mensual entre la serie de datos puntuales y de grilla, período 1960 - 1999.

En las figuras se observa la correlación pobre que presentan los datos de lluvia mientras que los de temperatura se mantienen alrededor de la recta a 45°. Esto también se evidencia en los coeficientes de regresión mostrados en las gráficas para cada una de las rectas de regresión, reflejando que los datos de precipitación poseen mayor variabilidad espacial que la temperatura dependiendo de la fuente de los mismos.

#### 4.4. Balance Hídrico.

En esta sección se describe la aplicación de un balance hídrico de tipo convencional, que puede ser representado a través de la siguiente ecuación (Scanlon et al., 2002):

$$P + Q_e = ET + Q_s + \Delta S \quad (4.1)$$

donde P es la precipitación;  $Q_e$  y  $Q_s$  son los caudales de entrada y salida, respectivamente (ya sea como agua superficial o subterránea); ET es evapotranspiración y  $\Delta S$  es el cambio en el almacenamiento del acuífero. La hipótesis básica para la aplicación del balance es que

cualquier cambio en el almacenamiento del acuífero se debe exclusivamente a la recarga proveniente de las precipitaciones. De esta forma, la metodología más común es estimar la recarga como el residuo que balancea la ecuación, ya que la mayoría de las otras variables son más fáciles de medir directamente en el campo.

Sin embargo, y a pesar de realizar una exhaustiva búsqueda, no se pudo contar con la información hidrométrica necesaria para calcular el flujo superficial hacia y desde la zona en estudio, por lo que estas variables también se estimaron indirectamente.

Por ende se utilizó la planilla de cálculo denominada Easy-Bal (Vázquez-Suñé y Castro, 2002) que estima la evapotranspiración potencial ETP a través de la fórmula de Thornwaithe para luego estimar otras variables de balance, partiendo sólo de datos meteorológicos y de las características del suelo.

#### **4.4.1. Aplicación de EASY-BAL.**

Easy-Bal es una planilla de cálculo utilizada para estimar la recarga mediante el método de Thornthwaite (Custodio y Llamas, 1979). La planilla fue construida por los profesores Enric Vázquez-Suñé y Adolfo Castro del Curso Internacional de Hidrología Subterránea (Barcelona, España) (Vázquez Suñé y Castro, 2002).

Este método permite estimar la Evapotranspiración Potencial (ETP) a partir de datos mensuales de temperaturas y de la latitud. Una vez calculada la ETP, la Evapotranspiración Real (ETR) se calcula teniendo en cuenta las características del suelo de la región en términos de disponibilidad de agua, es decir considerando la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la humedad inicial, la reserva útil, el espesor del suelo; y la precipitación para el período considerado.

A partir de los datos de ETR y de precipitación se calcula el déficit o exceso hídrico, en caso de existir exceso de agua, aportará a la recarga.



La recarga promedio estimada en la zona con la serie de datos puntuales para el período 1960-1997 (años para los que se contaba con datos de temperatura “puntuales”) fue de 139,5 mm/año (8,6 % de la precipitación media anual), utilizando una reserva útil de 100 mm y un valor de laminación (VL) similar.

La evolución mensual y anual de la recarga, junto con las precipitaciones mensuales y anuales, se puede observar en las Figuras 4.6 y 4.7, respectivamente. Ambas variables muestran un comportamiento bastante similar, aunque se observa un pequeño desfazaje temporal en algunos de los picos, ocurriendo la recarga con un cierto retardo; cuestión atribuible a las propiedades de infiltración del suelo y a los estados de humedad precedentes.

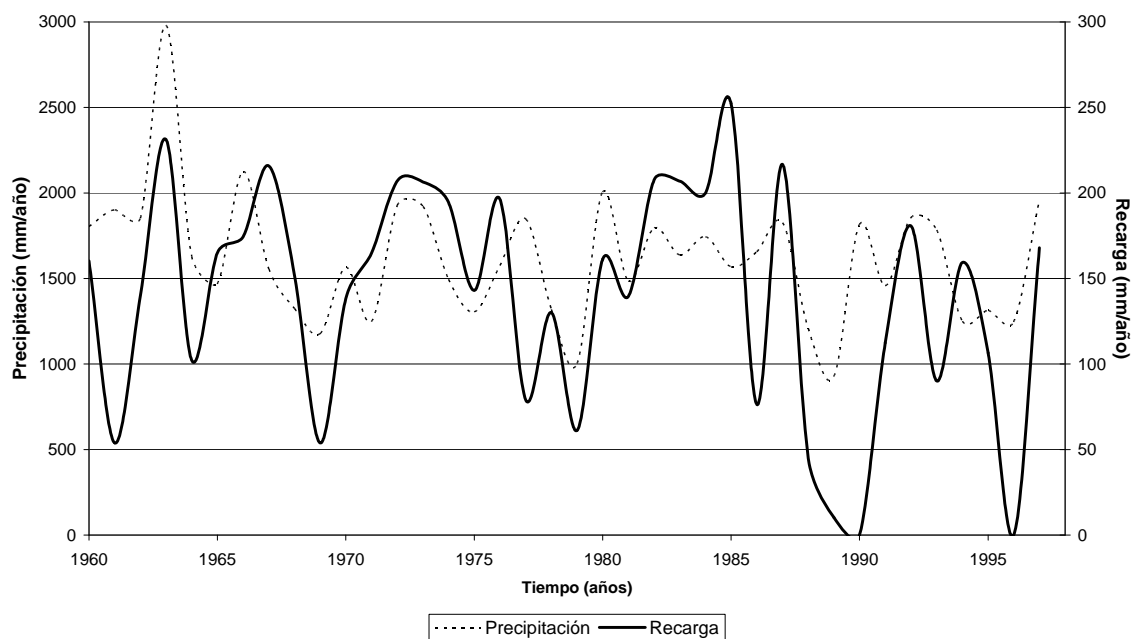


Figura 4.6: Evolución de la recarga anual respecto de las precipitaciones. Serie de datos puntuales, período 1960 – 1997.

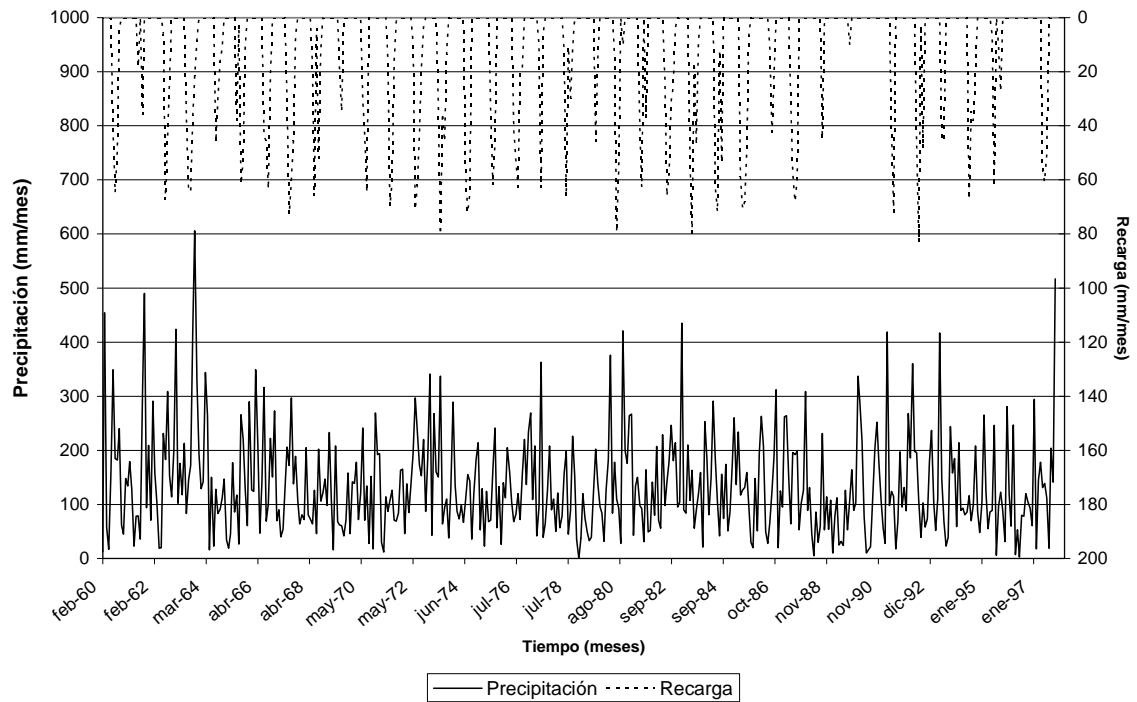


Figura 4.7: Evolución de la recarga mensual respecto de las precipitaciones. Serie de datos puntuales, período 1960 – 1997.

Para esta serie de datos se aplicó la misma planilla para realizar una estimación gruesa de la recarga que pueden recibir los basaltos. La presencia de estas rocas con permeabilidad secundaria se simuló con un valor de laminación mucho menor, es decir que se necesita una precipitación menor para que se produzca escurrimiento superficial. Dicho valor resultó en 75 mm, y la recarga media anual obtenida fue de 47,2 mm/año, un 2,9 % de la precipitación media anual.

Lo explicado en los párrafos precedentes también se realizó para la serie de datos de grilla. La recarga anual promedio estimada en la zona para el período 1901 – 2002 fue de 152,6 mm/año (9,84 % de la precipitación media anual), utilizando una reserva útil de 100 mm y un valor de laminación (VL) similar.

A continuación se muestran la evolución anual y mensual de la recarga obtenida junto con las precipitaciones (Figuras 4.8 y 4.9).

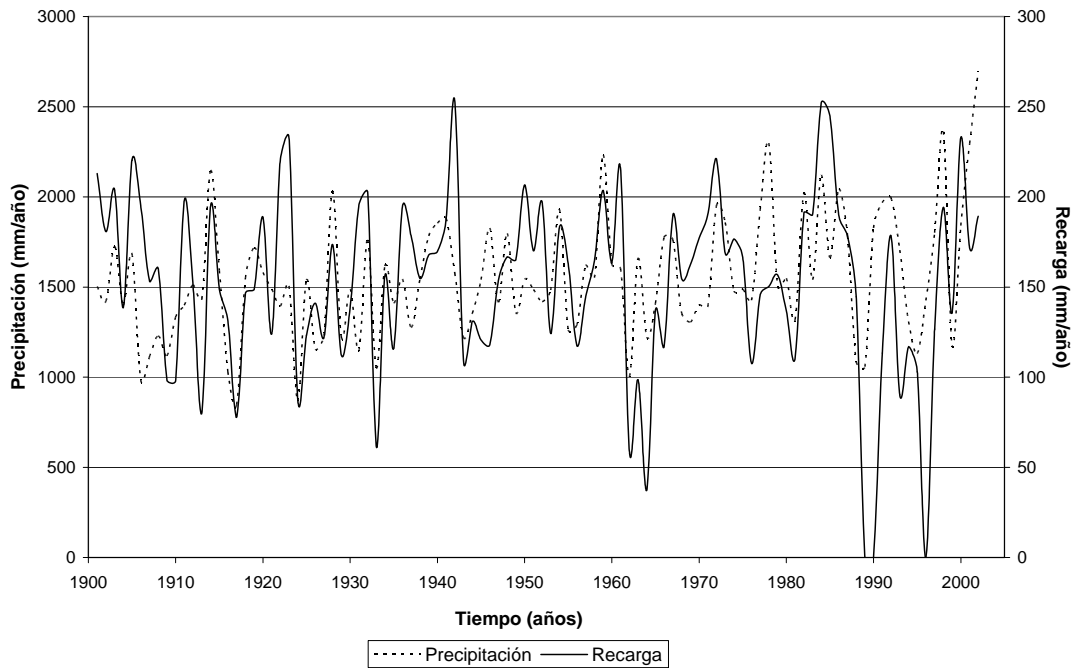


Figura 4.8: Evolución de la recarga anual respecto de las precipitaciones. Serie de datos de grilla, período 1901 – 2002.

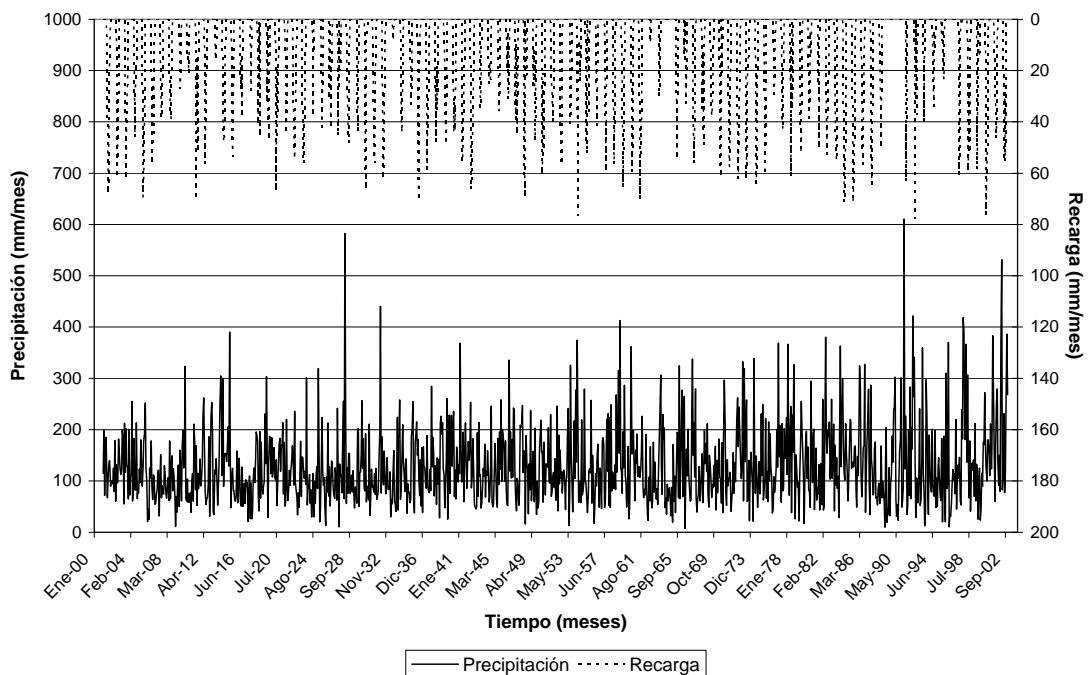


Figura 4.9: Evolución de la recarga mensual respecto de las precipitaciones. Serie de datos de grilla, período 1901 – 2002.

Sobre basaltos la recarga calculada con esta serie fue de 48,9 mm/año o sea un 3,15 % de la precipitación media anual, similar a la obtenida para la serie de datos puntuales.

La Figura 4.10 presenta la recarga anual obtenida para ambas series de datos (puntuales y de grilla) donde se pueden observar diferencias importantes en ciertos años (1961, 1969, 1979, 1986), pero que se explicarían parcialmente por el efecto de suavizado que tienen los datos de precipitación estimados en la serie de grilla. Este hecho evidencia aún más lo explicado en el ítem 4.2 acerca de la incertidumbre asociada a cada metodología de estimación.

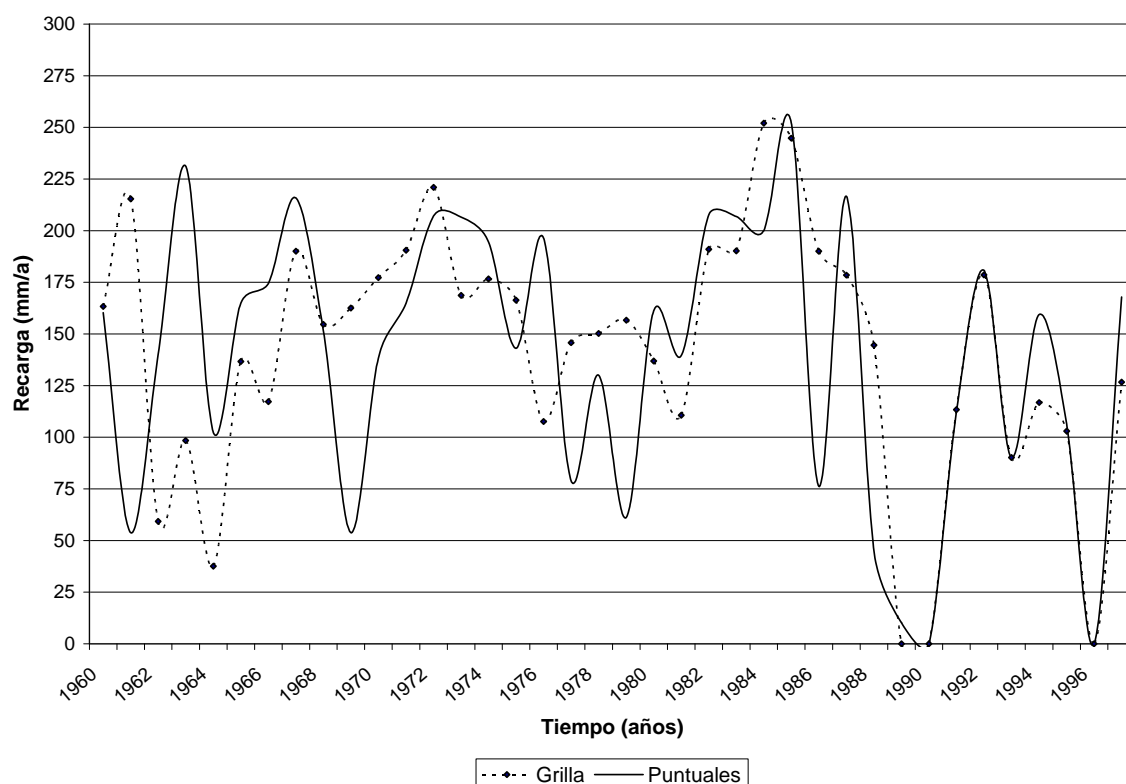


Figura 4.10: Comparación de tasas de recarga anuales estimadas a partir de las series de datos puntuales y de grilla.

Sin embargo, vale aclarar que los porcentajes de recarga sobre las areniscas obtenidos para ambas series de datos están en el orden del utilizado por Rodríguez et al. (2006), resultante de la calibración del modelo numérico implementado, y que fue de 8,55 % de la precipitación media anual en Rivera para el período 1960 - 1991. Por otro lado, se observan diferencias importantes en cuanto a la recarga sobre los basaltos dado que en el

modelo numérico previo se desconocía el orden de magnitud de dicha recarga. A modo de resumen se presenta la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Valores de recarga por formación. Se incluye entre paréntesis el porcentaje respecto a la precipitación media anual

Variable	EASY-BAL		Rodríguez et al, (2006)
	Datos puntuales	Datos de Grilla	
Recarga media anual - areniscas (mm/año)	139,5 (8,6 %)	141,1 (8,82 %)	140,2 (8,55 %)
Recarga media anual - basaltos (mm/año)	47,2 (2,9 %)	43,6 (2,72 %)	1,3 (0,08 %)
Precipitación media anual	1620	1599,4	1639

En la tabla precedente se presentó la recarga media anual para el período común en ambas series, es decir 1960 - 1997. Si se contabiliza la recarga media anual con la serie de datos de grilla para el período completo (1901 – 2002) se obtiene un valor de 152,6 mm/año con una precipitación de 1551 mm/año, es decir un 9,84%, valor que resulta algo mayor al obtenido previamente pero dentro del mismo orden de magnitud.

#### 4.4.2. Análisis de sensibilidad.

Debido a que se desconocía el Valor de Laminación (VL) y a que esta metodología es sensible a dicho parámetro, se realizó un análisis de sensibilidad respecto del mismo.

En la Figura 4.11 puede observarse el resultado obtenido para la serie de datos puntuales. En abscisas se graficó el valor del parámetro analizado relativo al valor de calibración, es decir, en abscisas se utilizó  $VL/VL_{100}$ , que significa el VL testado en relación a su valor de calibración (en este caso 100 mm). En ordenadas se graficó la

recarga relativa, esto es el cociente entre la recarga obtenida para un valor dado del parámetro VL y el valor de recarga obtenido para VL<sub>100</sub>. A dicho valor se restó una unidad para resaltar los aumentos o disminuciones de recarga relativa. Este formato se seguirá para los sucesivos gráficos de sensibilidad.

La mencionada gráfica muestra una relación aproximadamente parabólica entre R y VL para esta serie de datos, la recarga aumenta cuando VL aumenta, y viceversa pero a tasas diferentes. Si VL disminuye un 50 %, la recarga disminuye un 100 %, pero en cambio si VL aumenta 50 % la recarga aumenta solo 60 %.

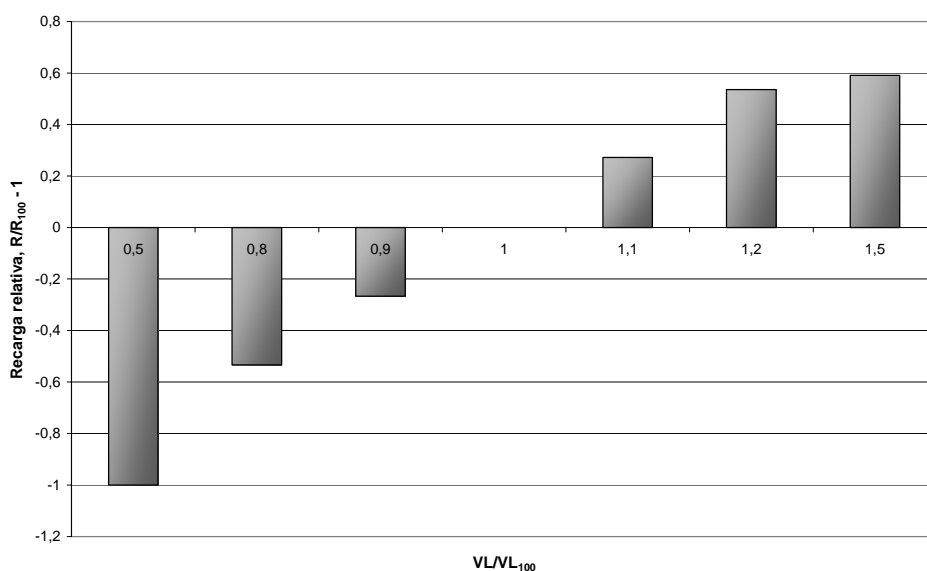


Figura 4.11: Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto del Valor de Laminación. Serie de datos puntuales, período 1960 - 1997.

No ocurre lo mismo si se realiza el análisis respecto a la Reserva Útil del suelo, otro de los parámetros de Easy-Bal (Figura 4.12). En este caso no se observa un comportamiento bien definido. Este parámetro de reserva útil representa la cantidad de agua entre la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente, ambos característicos del tipo de suelo y del comportamiento del mismo en la zona no saturada, por lo tanto se infiere que para el caso analizado no influye significativamente en la estimación de la tasa de recarga que efectivamente alcanza el acuífero.

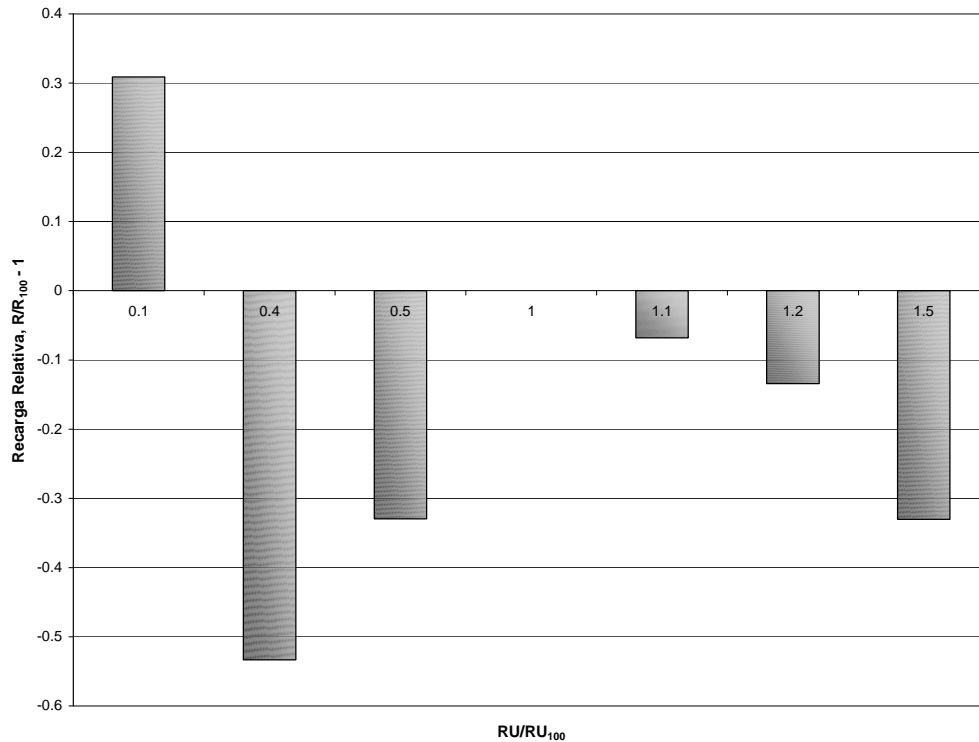


Figura 4.12: Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto de la reserva útil del suelo. Serie de datos puntuales, período 1960 - 1997.

El análisis de sensibilidad respecto a estos parámetros para la serie de datos de grilla arrojaron resultados similares a los encontrados para la serie de datos puntuales (Figuras 4.13 y 4.14), es decir una relación tipo parabólica respecto a VL, y ninguna relación específica respecto a la Reserva Útil.

En el caso de la Figura 4.13 todos los puntos tiene el mismo valor que los graficados en la Figura 4.11. Respecto a la Figura 4.14 la recarga relativa difiere de la calculada en la Figura 4.12 en los puntos de  $RU/RU_{100}$  0,4 y 0,5. Este hecho verifica nuevamente la independencia de la recarga respecto a este parámetro.

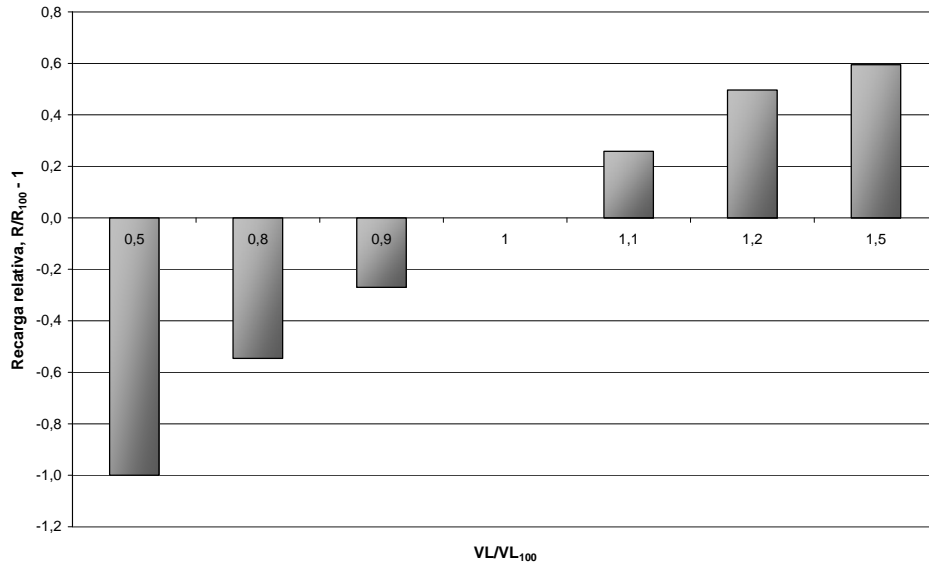


Figura 4.13: Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto del Valor de Laminación. Serie de datos de grilla, período 1901 - 2002.

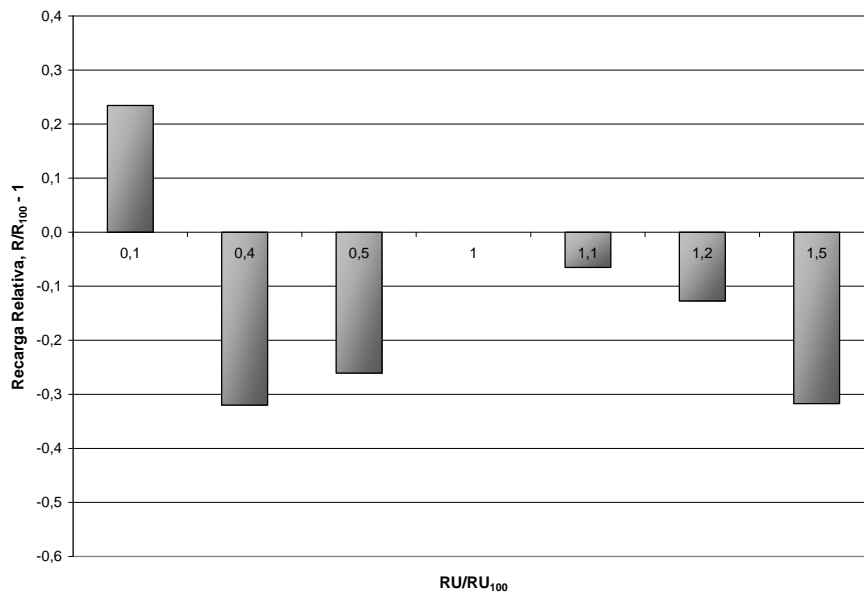


Figura 4.14: Análisis de sensibilidad de la recarga anual respecto de la reserva útil del suelo. Serie de datos de grilla, período 1901 - 2002.



## CAPÍTULO 5

# MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Uno de los productos del PSAG será el modelo hidrogeológico del funcionamiento hidráulico de todo el Sistema Acuífero Guaraní. Si bien este producto está en plena elaboración, existen valiosos antecedentes que han permitido postular, y en ciertos casos verificar al menos regional o localmente, la extensión del acuífero, las direcciones principales de flujo, y las zonas de recarga y descarga, todos ellos influenciados en mayor o menor medida por un control estructural somero y profundo, local y/o continental. En este sentido, el objetivo principal de este capítulo es postular el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del SAG en la zona de estudio, en base a toda la información detallada en los capítulos precedentes de esta tesis.

### 5.1. Modelo regional de la Cuenca Norte del Uruguay.

La República Oriental del Uruguay se divide en cuencas sedimentarias (Figura 5.1). Dentro de la Cuenca Norte se encuentra emplazada la zona de estudio.

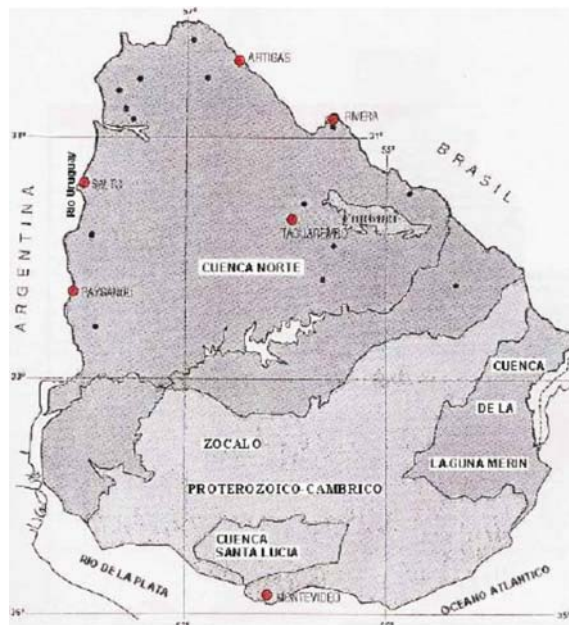


Figura 5.1: Cuencas sedimentarias del Uruguay. Fuente: Oleaga (2002a), modificado de De Santa Ana y Ucha, 1994.

Según Silva Busso (1999) y Oleaga (2002a), la misma presenta la siguiente secuencia hidrogeológica:

- a) Acuífero superior, constituido por sedimentos y sectores superiores alterados de los derrames basálticos.
- b) Acuitardo superior, constituido por basaltos no alterados.
- c) Acuífero inferior, constituido por rocas sedimentarias de edad Triásico-Jurásica, más antiguas que las del primer acuífero.
- d) Acuitardo inferior, constituido por rocas sedimentarias Devónico-pérmicas.
- e) Basamento

En la Figura 5.2 se presenta un esquema del modelo hidrogeológico referido, que representa un perfil estratigráfico en la dirección del flujo en el centro de la Cuenca Norte entre las localidades de Tacuarembó y Salto. Dichas ciudades se pueden ubicar en la Figura 5.1.

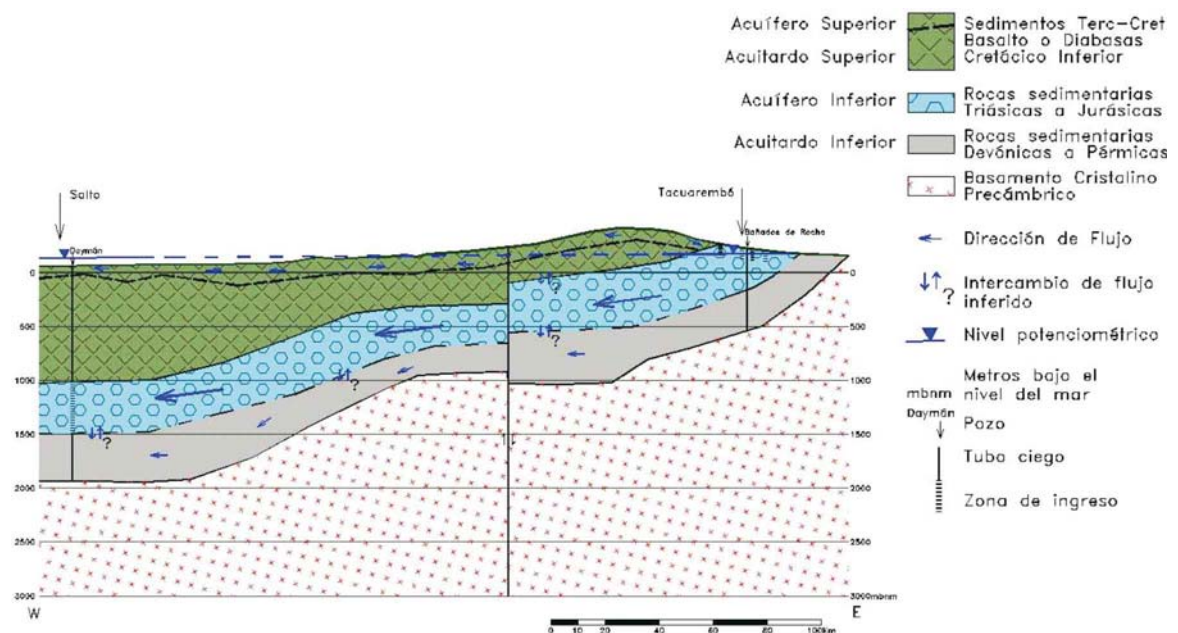


Figura 5.2: Sección hidrogeológica representativa del modelo principal de flujo en dirección E - O. Tacuarembó-Salto (Oleaga, 2002a)

En Uruguay, el acuífero superior constituido por los derrames basálticos alterados y/o fisurados es utilizado para el abastecimiento de poblaciones pequeñas y establecimientos rurales con caudales de explotación que no superan los 40 m<sup>3</sup>/h (Oleaga, 2002a). La profundidad máxima de explotación ronda los 50 m dado que a mayor profundidad los basaltos tienen un grado de alteración menor y por lo tanto disminuyen las posibilidades de extracción de agua y aumentan los costos de perforación y explotación. Debajo de los sectores alterados se desarrollaría un acuitardo que comprende todo el espesor de basaltos no alterados que se extienden hasta las areniscas del SAG.

El acuífero inferior, o SAG propiamente dicho, se ubica por debajo de los basaltos confinantes, tornándose libre en la zona de afloramientos (departamentos de Tacuarembó y Rivera) y en algunos sectores bajo el basalto (noreste de la ciudad de Artigas). Según Oleaga (2002a), posee una porosidad media entre 20 y 30 %. Este acuífero comprende las Formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista (ver Figura 2.5a), es de comportamiento multicapa, aunque sólo existe información de diferenciación hidráulica (carga y transmisividad) en la zona de afloramientos.

En un principio se consideraba al SAG en Uruguay como un sistema de alta transmisividad hidráulica (Gilboa et al. 1976, Gilboa 1977). En el área de estudio, a partir de mediciones propias y anteriores de Tahal (1986), Montañó y Carrión (1990) y Montañó et al. (1998) calcularon valores de transmisividad entre 250 y 1500 m<sup>2</sup>/d, rango coincidente con el reportado por Decoud y Rocha (2000). Los valores aportados por Hidrosud (1988) son comparables aunque a partir de sus propios datos de campo obtuvieron una transmisividad entre 83 y 460 m<sup>2</sup>/d para el pozo de OSE Salto.

Oleaga y de los Santos (2003) reinterpretaron la información de ANCAP (1987), OSE (1993), Oleaga (1998, 2002b), de Souza (2001, 2002), de los Santos (1999, 2001), utilizando distintas metodologías, y obteniendo valores de transmisividad menores y acotados en un rango que va desde 67 a 198 m<sup>2</sup>/d. Todas las perforaciones analizadas

alcanzaban las areniscas de la Formación Tacuarembó y, en su enorme mayoría, también explotaban parcialmente a la Formación Buena Vista.

Debajo del SAG se ubican rocas de edad pérmica. La parte superior de este paquete sedimentario se compone de rocas poco permeables, consideradas como un acuitardo de unos 300 m de espesor medio. Bossi y Schipilov (1998) indican que tienen una conductividad hidráulica de 0,17 m/d, lo que equivaldría a una transmisividad media de 51 m<sup>2</sup>/d, valor muy cercano al límite inferior del rango de transmisividad del SAG encontrado por Oleaga y De los Santos (2003). Debajo de este paquete sedimentario se encuentran rocas que contienen un acuífero de mucha menor productividad que el SAG, de 200 m de espesor medio, saturado generalmente de agua salina. También señalan que las areniscas correspondientes a tales formaciones geológicas presentan una conductividad hidráulica de 0,5 m/d en la perforación Almirón y 0,05 m/d en el pozo Paso Ullestie (ambas perforaciones ubicadas en el sector sur de la Cuenca Norte), con un caudal de 52 m<sup>3</sup>/h para la primera y menos de 10 m<sup>3</sup>/h para la segunda.

A su vez, estas rocas del acuitardo inferior en algunas zonas sobreyacen a rocas sedimentarias de fina granulometría y Edad Devónica que, se estima, también presentan muy baja conductividad hidráulica.

Finalmente el basamento hidrogeológico lo constituye el basamento cristalino, base de la Cuenca Norte, integrado por rocas precámbricas; principalmente, graníticas y metamórficas (gneises y granitoides) (ver Figura 2.5a).

## **5.2. Modelo local: Rivera-Santana do Livramento.**

Si bien existen modelos hidrogeológicos conceptuales previamente definidos por Silva Busso (1999) y Oleaga (2002a), los mismos son de carácter regional y no local como el presente estudio.

La información antecedente disponible y la generada durante la ejecución del proyecto del Fondo de Universidades (perfiles y niveles de más de 50 perforaciones) permitió revisar el modelo conceptual postulado por Oleaga (2002a) y formular un nuevo modelo conceptual más detallado del funcionamiento del sistema acuífero. Por ende, el material de este capítulo ha sido reelaborado a partir del informe correspondiente (Rodríguez et al., 2006).

Geológicamente el área próxima a las dos ciudades se caracteriza por un predominio de las areniscas de la Formación Tacuarembó (cuyo miembro superior se asocia a la Formación Botucatu en Brasil), cerros de basaltos de la Formación Arapey (Serra Geral en Brasil) y sedimentos recientes próximos a los cauces principales. La correlación entre las formaciones Tacuarembó y Botucatu está en discusión ya que esta última formación es de origen eólico y en Uruguay no hay agrupaciones de dunas, sino sectores de ambiente fluvio-lacustre dentro de los cuales se detectan dunas (Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004). Un concepto más aceptado es que Botucatu se asocie al miembro superior del Tacuarembó, denominado comúnmente Formación Rivera por diversos autores. Ver Figura 2.5 para identificación de formaciones.

El pasaje entre los basaltos y las areniscas subyacentes está caracterizado por la presencia de pendientes pronunciadas fácilmente identificables en el campo o en la cartografía con curvas de nivel. Al oeste de la Ruta Nacional N° 5 y hasta el comienzo de las coladas de basalto predomina el afloramiento de la Formación Rivera (por ubicación de la ruta ver Figura 2.11).

La transmisividad de las areniscas de la Formación Rivera está entre 140 y 300 m<sup>2</sup>/d y para la Formación Tacuarembó, con espesores de más de 500 m en el noreste, está entre 25-120 m<sup>2</sup>/d (Tabla 3.2). Los datos de parámetros hidrogeológicos de la Formación Serra Geral son escasos. Flores Machado (2005) recopiló valores del estado de Río Grande do Sul reportando caudales específicos entre  $3,5 \times 10^{-3}$  y 37,7 m<sup>3</sup>/h/m o entre 0,016 y 2,556

m<sup>3</sup>/h/m, según Haussman (1995). Los valores de conductividad hidráulica mencionados en dicha fuente rondan los 0,9 m/d.

Desde el punto de vista hidráulico, en el desarrollo del Proyecto del Fondo se detectaron distintos niveles de aporte, uno en el acuífero superior, contenido en las fisuras y fracturas de los basaltos, el cual tiene un nivel hidráulico decenas de metros por encima del detectado en las areniscas. La existencia de este gradiente vertical entre basaltos y areniscas constituye un indicador potencial de flujo descendente entre ambas formaciones. Como es sabido, el análisis hidrogeoquímico es una metodología muy utilizada en forma complementaria al análisis piezométrico. Por ende, se realizaron análisis de muestras de agua en la zona de estudio con el fin de verificar la hipótesis de recarga al SAG a través del basalto por medio de la medición de arsénico y flúor (parcialmente verificada por los niveles piezométricos). Lamentablemente, las muy bajas concentraciones encontradas no permitieron seguir el agua que circula por las fisuras. No obstante, este agua se caracteriza por poseer altos valores de pH, conductividad y sodio mostrando una composición química muy distinta del resto del agua mostrada en otras formaciones del perfil estratigráfico, permitiendo su identificación en perforaciones que alcanzan las areniscas pero explotan conjuntamente el basalto o se encuentran muy cerca de los afloramientos de éste.

Debajo del basalto, principalmente en el sector uruguayo, se detectó un nivel conductivo en areniscas, que está hidráulicamente conectado a los cursos superficiales. A partir de las mediciones piezométricas realizadas en ese proyecto se pudo inferir que en Uruguay el flujo se dirige hacia el Arroyo Cuñapirú pero dado el escaso espesor de ese nivel y su casi desaparición del lado brasileño no es posible indicar un patrón de flujo en dicha zona. El agua en este medio se caracteriza por poseer valores de pH, conductividad y Sólidos Totales Disueltos (STD) muy bajos, mostrando características similares a las del agua de lluvia, recargada en sectores de casi ausencia o muy poco desarrollo de los suelos.

Las perforaciones mayores a 100 m han permitido la detección y análisis del acuífero profundo en sectores permeables de las areniscas del SAG que se ubican debajo de un paquete decimétrico poco permeable de extensión difusa (acuitardo). Este acuífero profundo se caracteriza por presentar los mayores valores de transmisividad hidráulica con descensos específicos superiores a  $3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . Actualmente la mayor parte de las perforaciones nuevas alcanzan el sector profundo y en su mayoría en forma exclusiva. Ensayos hidráulicos realizados en perforaciones con piezómetros de OSE permitieron verificar la gran anisotropía vertical existente, ya que a pesar de estar a pocos metros de distancia bombeos de más de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  no eran detectados en algunos piezómetros los cuales tenían sectores filtrantes a distinta profundidad que el pozo de extracción (Perez y Rocha, 2002).

El agua del acuífero profundo presenta valores de pH casi neutros y conductividad eléctrica de entre 100 y  $350 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

La diferenciación hidráulica entre las capas dentro del SAG es muy importante, destacándose el caso indicado de la panadería “La Ideal” donde dos pozos separados 4 metros que explotan distintos sectores permeables tienen casi 24 m de diferencia de nivel hidráulico. Para la ubicación de los pozos ver Figura 3.4.

En resumen, el trabajo realizado por Rodríguez et al. (2006) en cuanto a relevamiento de niveles en perforaciones, geología de campo y mapeo geológico de detalle, muestreo hidrogeoquímico, sumado a los antecedentes disponibles permitieron generar una base de conocimiento que sustenta un nuevo modelo conceptual sólido y, que en algunos aspectos contradice las presunciones existentes, por ejemplo: acuífero libre monocapa, con direcciones de flujo hacia el Oeste y comportamiento hidrogeológico simple.

El nuevo modelo conceptual local propuesto es el siguiente:

1. Acuífero superior, constituido por sectores superiores alterados de los derrames basálticos, con agua de alto pH y conductividad eléctrica.

2. Acuífero inferior o SAG, contenido en areniscas de edad Triásico-Jurásico, incluido en las formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista, que muestra un comportamiento de tipo multicapa, dentro del cual se detecta:

- a) Sector acuífero granular superior “somero”, constituido por areniscas, de un espesor de decenas de metros, de transmisividad hidráulica media, con agua de pH y conductividad eléctrica bajos, de características similares al agua de lluvia.
- b) Acuitardo, constituido por areniscas de alto contenido arcilloso, que constituye un medio poco permeable que regula el flujo entre los acuíferos granulares.
- c) Sector Acuífero granular inferior “profundo”, constituido por areniscas, de un espesor de más de cien metros, el cual presenta a su vez varios sectores permeables. Es el que presenta mayor transmisividad hidráulica, y se caracteriza por valores de pH próximos a la neutralidad y conductividad eléctrica de menos de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

3. Acuitardo inferior, constituido por rocas sedimentarias poco permeables, de edad Devónico-Pérmicas.

La Figura 5.3 muestra la traza por donde se han trazado los perfiles hidrogeológicos ilustrados en la Figura 5.4 (dirección NO – SE) y en la Figura 5.5 (dirección NE – SO).



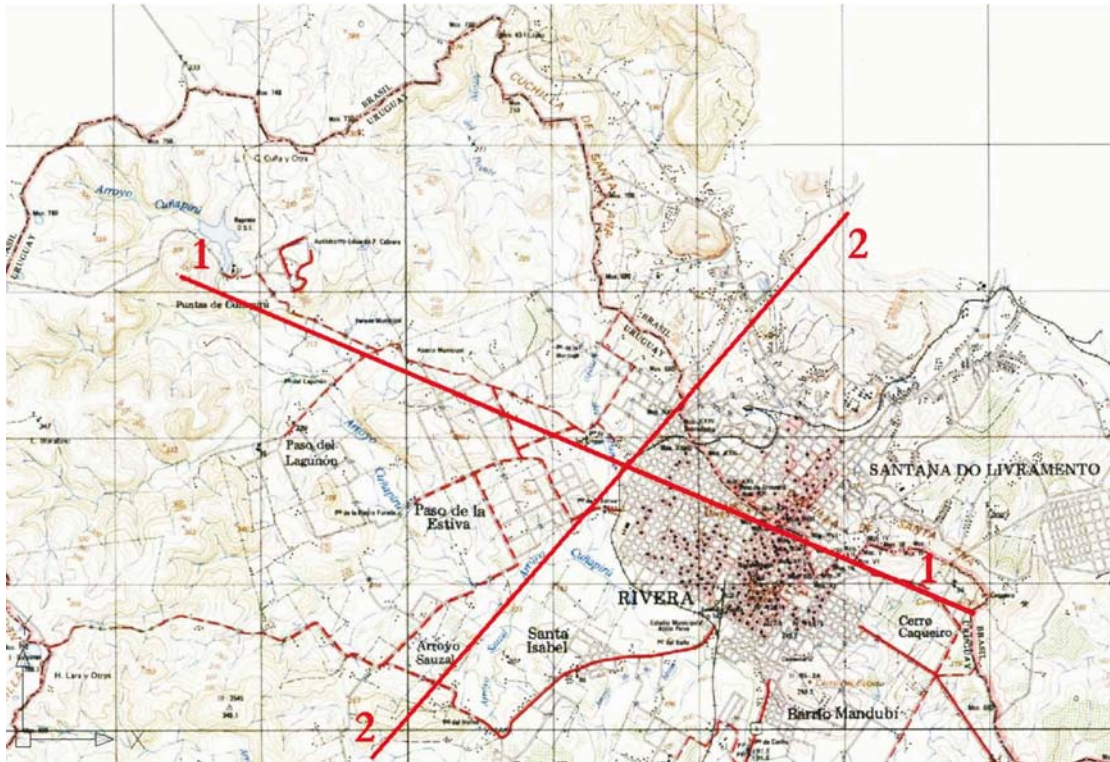


Figura 5.3: Ubicación de los perfiles elaborados en el área de estudio por Rodríguez et al. (2006).

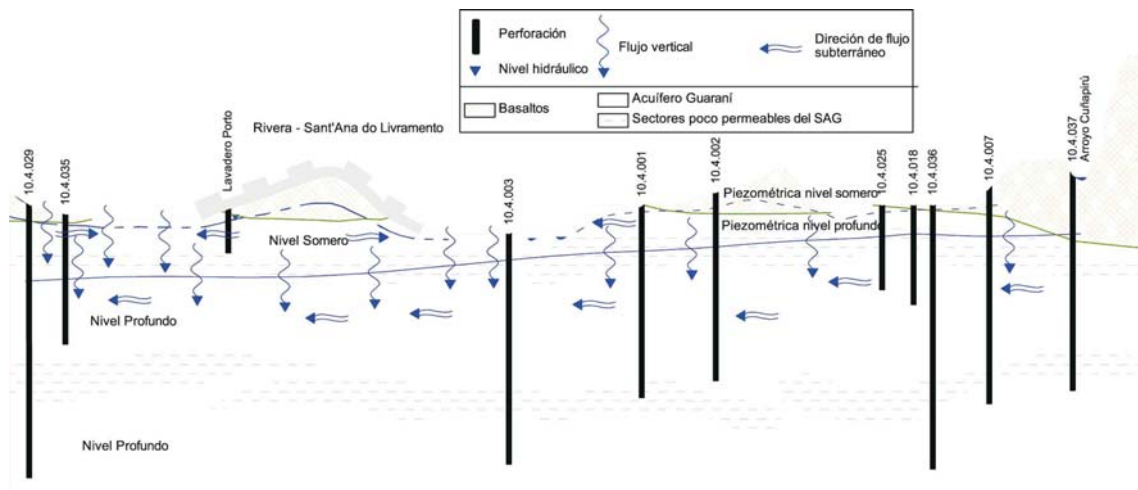


Figura 5.4: Perfil de la Sección 1-1 (Rodríguez et al., 2006).

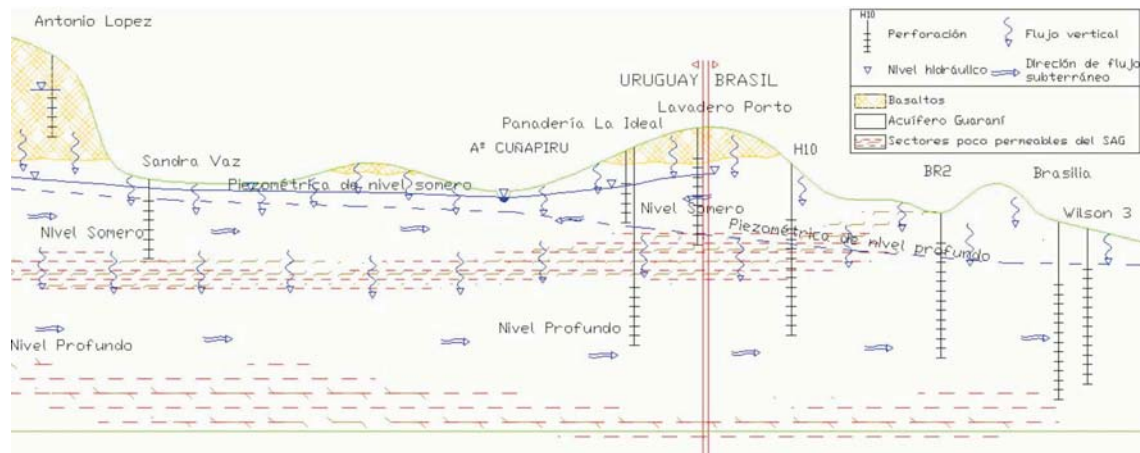


Figura 5.5: Perfil de la Sección 2-2 (Rodríguez et al., 2006).

Las Figuras precedentes muestran que parte del agua de lluvia infiltraría en las fisuras de los basaltos, y descendería parcialmente hacia el sector permeable superior del SAG (acuífero somero). Esta recarga se caracteriza por su alta conductividad eléctrica y pH. Asimismo, este sector “somero” recibe recarga de agua de lluvia que percola directamente a través del suelo en las áreas aflorantes. La gran extensión de este sector permeable produce que el agua que infiltró en basaltos y se dirige dentro de las areniscas hacia los sectores bajos se vaya mezclando con agua recargada verticalmente, produciendo una disminución de la conductividad eléctrica y pH originales en dirección del flujo.

Aunque buena parte del agua que circula en el sector acuífero “somero” descarga en las corrientes superficiales, una cantidad importante de agua desciende hacia el sector acuífero “profundo” atravesando el sector poco permeable (acuitardo). En este proceso y posterior circulación en el sector profundo se genera un incremento de los carbonatos, STD y con eso de la conductividad eléctrica y pH.

## **CAPÍTULO 6**

### **MODELO NUMÉRICO**

El modelo conceptual presentado en el capítulo anterior fue transformado en un modelo numérico del flujo de agua subterránea. Los principales objetivos de la modelación fueron:

- 1) Validar el modelo hidrogeológico conceptual propuesto en el Capítulo 5;
- 2) Reproducir el funcionamiento actual del sistema, y
- 3) Estimar un valor aproximado de la recarga de las areniscas del SAG, ya sea proveniente de los basaltos suprayacentes (recarga indirecta) como de la precipitación (recarga directa).

A continuación se presenta una revisión de modelos numéricos previos en la zona del SAG. Seguidamente se brinda una síntesis de las características principales del código numérico y de la interfase gráfica utilizada, para luego explicar detalladamente la implementación y la calibración del modelo. Por último se presentan y discuten los resultados alcanzados, así como también un análisis de sensibilidad y se analizan algunas hipótesis de explotación futuras.

#### **6.1. Antecedentes en modelación del SAG.**

Los modelos numéricos disponibles del SAG podrían clasificarse entre aquellos de alcance regional (miles de km<sup>2</sup>) y aquellos de alcance local (menos de 1000 km<sup>2</sup>).

La primera simulación numérica de carácter regional del SAG fue realizada por Campos (2000) y Vives et al. (2001), quienes emplearon el código numérico Transin II (Medina et al., 1996), que resuelve las ecuaciones de flujo subterráneo y el transporte de solutos mediante un esquema en elementos finitos, y permite la estimación automática de parámetros o Problema Inverso. El principal objetivo de la simulación fue validar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema, utilizando como herramienta la

cartografía hidrogeológica generada para el área (Campos, 2000). Dicho modelo cubrió casi todo el SAG, excepto un gran sector de Paraguay y Argentina, y todo el Uruguay (Figura 6.1); la discretización vertical fue monocapa, es decir que sólo se consideró la formación geológica que contiene al SAG.

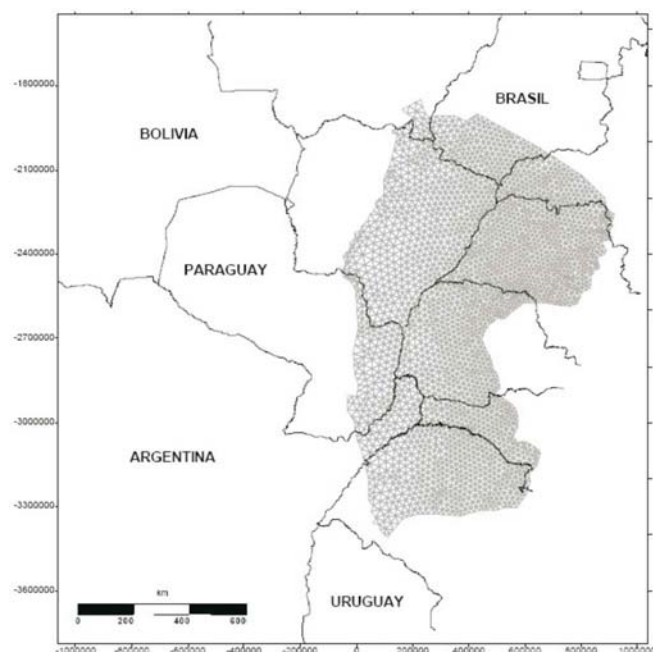


Figura 6.1: Malla de elementos finitos del modelo de Campos (2000).

En cuanto al ajuste de la piezometría calculada los autores obtuvieron una desviación típica de 30 m, que fue considerada aceptable teniendo en cuenta la escasez y la poca fiabilidad de la información piezométrica disponible. La recarga en la zona aflorante la estimaron durante el proceso de calibración y fue entre 130 a 180 mm/año (Campos, 2000; Vives et al., 2001).

Dicho modelo, además de constituir un principio de integración y sistematización de toda la información antecedente hasta ese momento, permitió identificar algunas limitaciones de la misma, como ser: conocimiento deficiente de la geometría y estructuras geológicas; poca fiabilidad en las mediciones de los pozos de observación utilizados para la calibración; escasez de información actualizada de explotación del acuífero y carencia de estudios regionales que permitan estimar parámetros hidráulicos.

Más recientemente, Vassolo (2005) implementó el código FEMWATER (Yeh, 1987) bajo la interfase GMS (Groundwater Modeling System, 2002), en el área oriental paraguaya ocupada por el SAG. Su principal objetivo fue estimar la recarga tanto directa como la que llega a la formación acuífera a través de los basaltos suprayacentes. La recarga de origen pluviométrico estimada sobre las areniscas del SAG resultó en 146 mm/año ( $\approx$  7-8 % de la precipitación promedio anual) que, al multiplicarse por el área modelada (191250 km<sup>2</sup>), supera ampliamente el volumen de agua extraído por las perforaciones profundas de la zona. En su última actualización al modelo (Vassolo, 2007) se diferenciaron pozos someros y profundos, pudiéndose detectar conos de depresión en las áreas de mayor explotación.

Dentro de los modelos de alcance local (menos de 1000 km<sup>2</sup>) se encuentran los trabajos de Velásquez et al. (2007) y Lavalin (2007). Los primeros implementaron un modelo numérico de 550 km<sup>2</sup> de extensión en la zona del municipio de Araguaí, Estado de Minas Gerais, Brasil. En este caso se utilizó el programa en diferencias finitas MODFLOW bajo la interfase Visual Modflow 4.1.0 (Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2005). El modelo simuló una capa acuífera de 38 m de espesor medio. A pesar de que la información necesaria para la calibración del modelo fue escasa, los autores pudieron estimar un valor de recarga preliminar, en el orden de los 200 mm/año para la zona en estudio, que representaría más de un 10 % de la precipitación media anual.

Lavalin (2007) implementó un modelo monocapa del SAG, sin considerar los basaltos suprayacentes, en el área Salto – Concordia. Los resultados del mismo aún no fueron publicados.

El modelo que se presenta en este capítulo tiene como antecesor al modelo realizado por Rodríguez et al. (2006) en el Proyecto del Fondo de Universidades del PSAG. Dicho modelo simuló un área de 650 km<sup>2</sup> con centro en las localidades de Rivera y Santana do Livramento, y permitió verificar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema

propuesto. En dicha oportunidad se pudo estimar una tasa de recarga sobre los basaltos y sobre las areniscas del 0,1 % y del 8% de la precipitación media anual, respectivamente. Los aspectos que se mejoraron con este nuevo modelo incluyen una discretización estratigráfica más correcta de la zona, la extensión de la zona modelada para que los bordes no queden muy cercanos a las zonas de explotación del acuífero, y la actualización de la información hidrogeológica para acotar la incertidumbre en la calibración de todos los parámetros involucrados.

## 6.2. Código numérico.

Dada su versatilidad en la aplicación a una amplia gama de problemas se eligió el código numérico MODFLOW (Mc Donald and Harbaugh, 1998; Harbaugh et al., 2000). El pre y pos-procesamiento de datos y resultados se realizó mediante la interfase GMS V.6.0 (Groundwater Modeling System, 2006).

### 6.2.1. Modelo matemático.

El flujo subterráneo de densidad constante a través de un medio poroso heterogéneo y anisotrópico puede describirse mediante la ecuación parabólica:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

donde  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  son los valores de conductividad hidráulica a lo largo de los ejes coordenados  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , que se asumen paralelos a los ejes principales de anisotropía (Bear, 1972) ( $L T^{-1}$ );  $h$  es la carga potenciométrica o carga hidráulica del acuífero ( $L$ );  $W$  es el flujo volumétrico por unidad de volumen de acuífero que representa las fuentes y/o sumideros de agua ( $W < 0$  significa agua saliendo del sistema subterráneo,  $W > 0$  significa agua entrando al sistema subterráneo) ( $T^{-1}$ );  $S_s$  es el almacenamiento específico del material poroso ( $L^{-1}$ ); y  $t$  es el tiempo ( $T$ ). En la ecuación (1) los términos entre paréntesis son las 3 componentes del flujo de Darcy  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$ , cuando los ejes cartesianos son paralelos a los

ejes principales de conductividad hidráulica. La Ley de Darcy está expresada como  $\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla h$  (Bear, 1972), donde  $q$  tiene dimensiones de  $(LT^{-1})$  y el operador gradiente  $\nabla$  tiene dimensiones de  $(L^{-1})$ .

El almacenamiento específico  $S_s$  y la conductividad hidráulica son parámetros físicos variables espacialmente, mientras que el término de fuentes y sumideros  $W$  puede ser función tanto del espacio como del tiempo.

Cuando se combina con condiciones iniciales y de borde apropiadas, la ecuación (1) describe el flujo transiente en tres dimensiones. Existen diferentes soluciones analíticas para dicha ecuación bajo hipótesis muy restrictivas (por ej. flujo horizontal, medio isótropo y homogéneo, etc.), sin embargo, los métodos numéricos deben emplearse para obtener soluciones aproximadas en el caso de aplicaciones hidrogeológicas de interés práctico.

### **6.2.2. Características generales de MODFLOW y GMS.**

MODFLOW es un código computacional tridimensional en diferencias finitas con una estructura modular que permite ser modificado para adaptarlo a cada aplicación particular.

La estructura modular consiste en un programa “principal” y una serie de subrutinas altamente independientes. Las subrutinas se agrupan en “paquetes”. Cada paquete es usado para simular una característica específica del sistema subterráneo, tal como el flujo desde los ríos o desde drenes, lagos, recarga, etc. y otros paquetes para resolver el conjunto de ecuaciones resultantes de la discretización en diferencias finitas.

La región a modelar se subdivide en bloques o celdas en los cuales las propiedades del medio se asumen uniformes. La ubicación de las celdas se describe en términos de filas, columnas y capas acuíferas. La aproximación espacial en diferencias finitas de la ecuación (1) puede ser derivada a través de la aplicación de la ecuación de continuidad en cada celda. De esta forma se obtiene un conjunto de ecuaciones lineales o no lineales

dependiendo del tipo de acuífero y de los elementos considerados. El sistema se resuelve con uno de los varios métodos de resolución del sistema de ecuaciones provistos por MODFLOW. En cada paso de tiempo se calculan la carga hidráulica del acuífero, las tasas de flujo y el balance de masa.

El GMS permite trabajar con dos modalidades, una denominada *Enfoque de Grilla*, donde todas las propiedades y características del sistema a modelar se cargan celda por celda, y otra denominada *Enfoque de Modelo Conceptual*, donde en primer lugar es necesario confeccionar un mapa conceptual con la información hidrogeológica que luego, mediante las herramientas de la interfase, es traducido al lenguaje computacional de MODFLOW. Así cada celda de la grilla adquiere las propiedades que le corresponden, ya sea que se trate de un río, zona de recarga, o una simple celda activa de flujo.

MODFLOW cuenta con tres paquetes diferentes para calcular el flujo subterráneo: Block-Centered Flow, BCF (Mc Donald and Harbaugh, 1988), Layer Property Flow, LPF (Harbaugh et al., 2000) y Hydrogeological Unit Flow, HUF (Anderman and Hill, 2000). El primer paquete calcula la conductancia entre cada celda de la malla y plantea las ecuaciones en diferencias finitas para el cálculo de flujo de una celda a otra. En el paquete LPF el usuario define las conductividades horizontales y verticales para cada capa, y MODFLOW calcula luego la conductancia entre celdas usando los valores de conductividad y la geometría de cada capa. HUF es el paquete más reciente y la ventaja que tiene sobre los otros dos es que permite definir la configuración vertical de las unidades hidrogeológicas de una manera independiente a la malla tridimensional 3D. En este caso el usuario define la cota superior y el espesor de cada unidad hidrogeológica, a la cual está asociada un material, y las propiedades hidráulicas son asignadas a dicho material, es decir que una misma capa de la malla 3D puede contener más de una unidad hidrogeológica. Las propiedades hidrogeológicas de una celda se calculan mediante un promedio entre las propiedades de las unidades que la componen.



En este trabajo se utilizó la modalidad de *Enfoque de Modelo Conceptual* y el paquete LPF debido a la complejidad del sistema a modelar.

### **6.3. Implementación del modelo.**

La etapa de modelación es una actividad muy compleja que precisa de una simplificación del problema en cuestión. Debido a esto se realizó un análisis de la información disponible en base a los objetivos buscados, y se adoptaron ciertas hipótesis de trabajo que se detallan en las secciones siguientes.

Los pasos seguidos en la implementación del modelo numérico fueron:

- Definición del área de modelación.
- Generación del Modelo Digital del Terreno (MDT).
- Confección de la estratigrafía tridimensional del área basada en el modelo conceptual e incorporación de la información topográfica.
- Discretización del dominio o generación de la malla en diferencias finitas.
- Definición de las condiciones de borde.
- Identificación e incorporación de las fuentes y/o sumideros relevantes.
- Incorporación de los parámetros hidrogeológicos del sistema estimados en la primera etapa del trabajo.
- Calibración manual para la situación actual utilizando la piezometría relevada durante los trabajos de campo. Los parámetros a calibrar fueron conductividades hidráulicas, conductancias de ríos y arroyos, recarga y flujos de entrada/salida en las condiciones de borde.
- Análisis de los resultados en términos de flujos, piezometría calculada, balances de masa, parámetros calibrados y ajuste de niveles observados.
- Análisis de sensibilidad de la recarga.

### 6.3.1. Área modelada.

La Figura 6.2 muestra los límites del área modelada, que cubre aproximadamente 750 km<sup>2</sup>. En general los bordes se eligieron en coincidencia con divisorias de agua y cursos de agua superficial. La mayor dificultad en la definición del borde estuvo en el sector brasilero, en el norte y el este del modelo. Al norte se utilizó un río colector de la red de drenaje aunque se desconoce si es una corriente transitoria o permanente, y por ende, no se cuenta con información de sus parámetros hidráulicos. En el este existe una zona de mayores elevaciones interrumpida por la intercepción de valles. Debido a la escasez de información topográfica y piezométrica en dicho sector brasilero, éste constituye el borde con mayor incertidumbre. Si bien se encuentra algo cerca de la zona de bombeo intensivo, situación no recomendable desde el punto de vista de la modelación, alejarlo aún más hubiera incrementado la incertidumbre asociada al mismo.

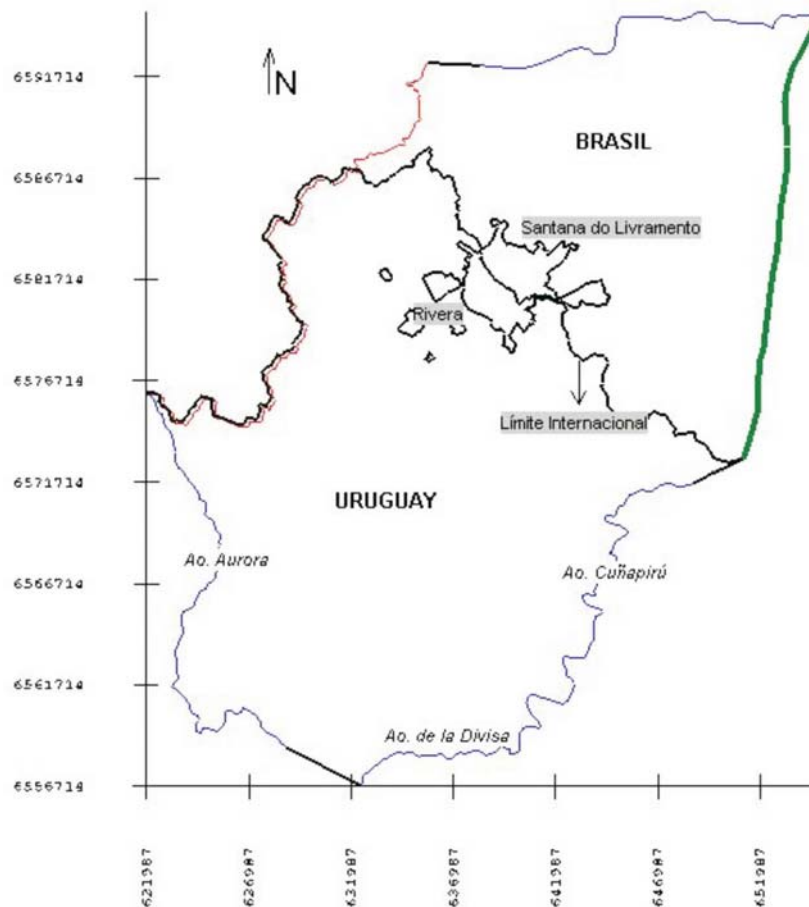


Figura 6.2: Área de estudio modelada.

El borde noroeste sigue un tramo del límite internacional sobre la formación Serra Peral. Los bordes suroeste y sureste son cursos de agua permanentes, los arroyos Aurora y Cuñapirú, respectivamente (Figura 6.2).. Dos arroyos menores separados por un relicto de basaltos de la misma formación, representado por un tramo recto, cierran el área modelada en el sector sur.

### **6.3.2. Generación del modelo digital del terreno.**

Uno de los elementos que se precisa para la generación de la malla es la superficie topografía, es decir el Modelo Digital del Terreno (MDT).

La información topográfica fue obtenida de las imágenes Shuttle Radar Topography Mision (SRTM) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://seamless.usgs.gov>). Dichas imágenes fueron captadas en el mes de febrero del año 2000, con una resolución de 3 segundos, es decir aproximadamente 90 m, lograda a partir de imágenes en banda C y X.

Dichas imágenes se descargaron georreferenciadas en formato geotiff para luego mediante el software ArcGis (ESRI, 2006) convertirlas al formato ASCII que es interpretado por la interfase GMS. La Figura 6.3 muestra el MDT de la zona de estudio. Las mayores altitudes se encuentran al oeste del área modelada, y se observa una red de drenaje bien definida.

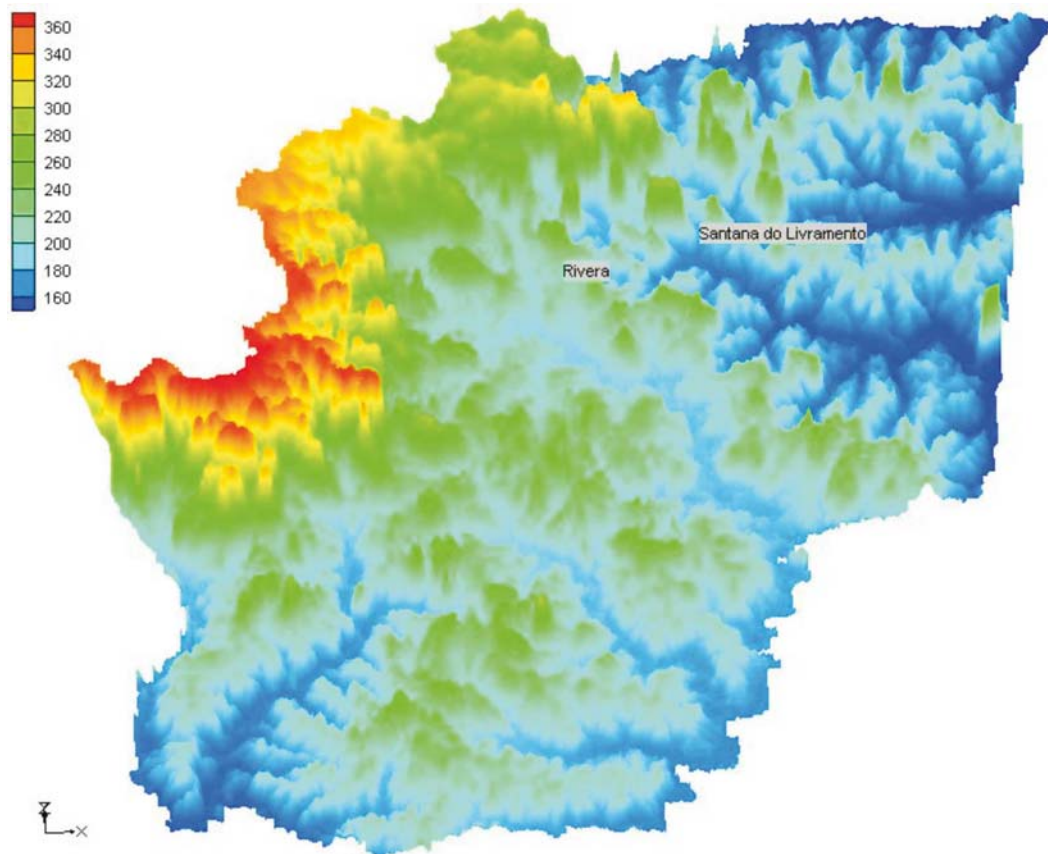


Figura 6.3: Modelo Digital del Terreno (alturas en metros). Nota: La escala vertical está magnificada en un 25 %.

### 6.3.3. Generación del sólido.

Se denomina “sólido” a la representación tridimensional de la estratigrafía. El análisis de la información estratigráfica disponible, el mapa geológico y los relevamientos realizados durante el proyecto marco se utilizaron para elaborar el modelo hidrogeológico conceptual presentado previamente, identificándose: 1) acuífero superior, alojado en sectores alterados de basaltos, 2) acuífero inferior, SAG, contenido en las areniscas. Dentro de este último se destacan: a) sector acuífero granular superior “somero”; b) acuitardo, constituido por areniscas de alto contenido arcilloso; c) sector acuífero granular inferior “profundo”. El sólido reproduce el modelo conceptual propuesto que, a diferencia de Rodríguez et al. (2006), incorpora la capa acuitarda en forma explícita. Las cotas superficiales del sólido se interpolaron a partir del modelo digital del terreno. La definición de espesores de las unidades en sectores con escasa información se realizó con el apoyo de

un mapa de isopacas (Pacheco, 2004) y la interpretación de la piezometría. Se trazaron múltiples secciones transversales uniendo pozos en todas direcciones con el fin de construir la tridimensionalidad litoestratigráfica del área modelada (Figura 6.4).

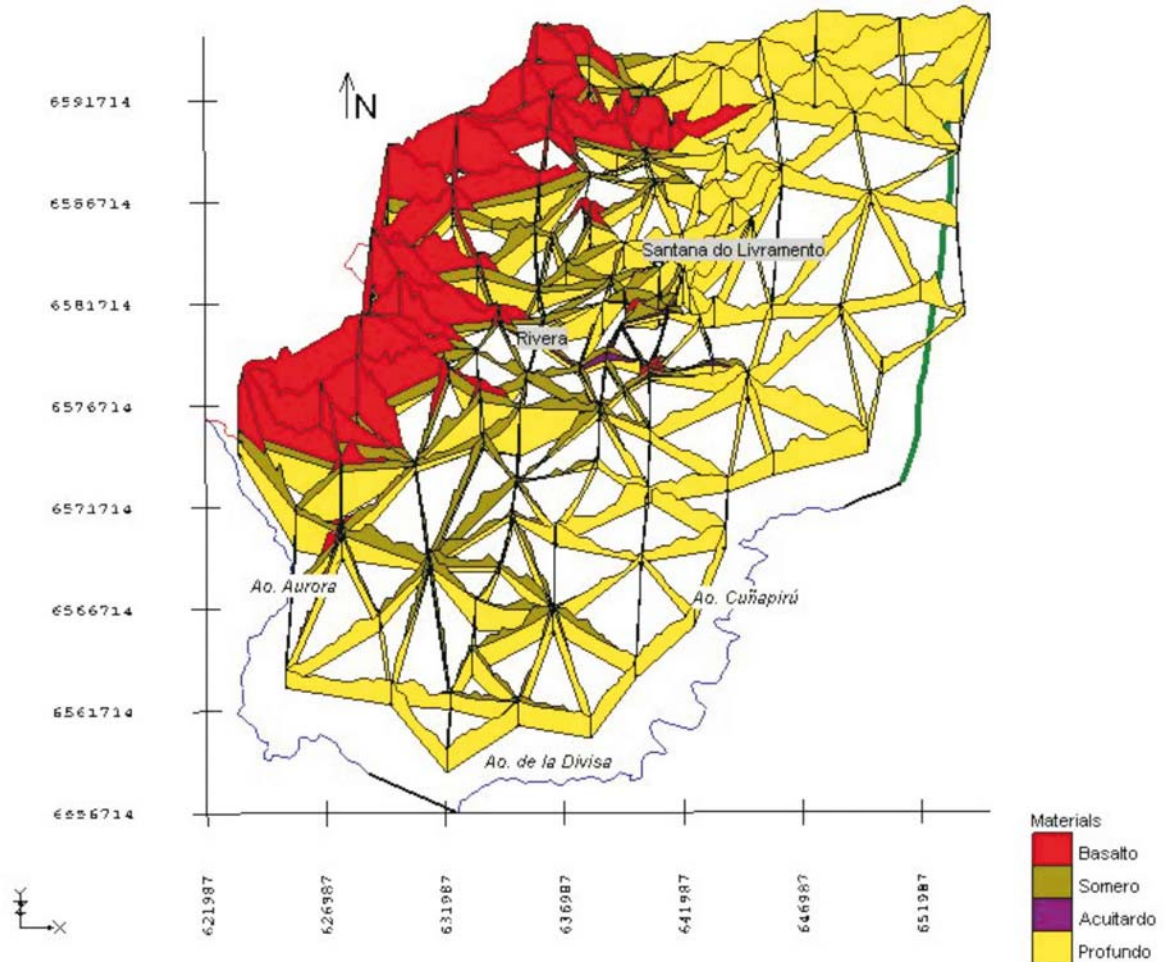


Figura 6.4: Secciones transversales utilizadas para la confección de la estratigrafía 3D.

La Figura 6.5 muestra la vista tridimensional de la estratigrafía interpolada. Los basaltos se ubican en el sector noroeste del área modelada mientras que las dos formaciones de areniscas se desarrollan por debajo de los basaltos, aflorando hacia el este. La capa de acuitardo que separa los sectores acuíferos “somero” y “profundo” aflora sólo en un pequeño sector en el centro del área modelada, y su extensión total se limita a unos 65 km<sup>2</sup>.

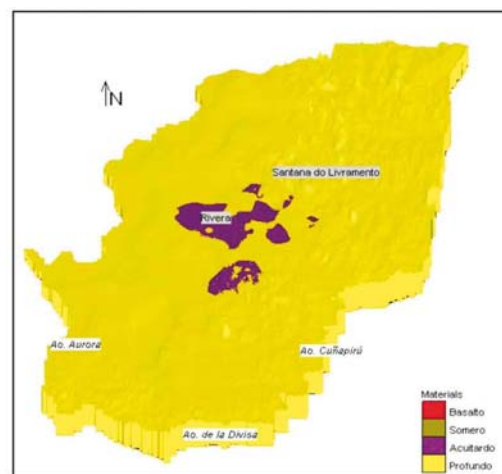
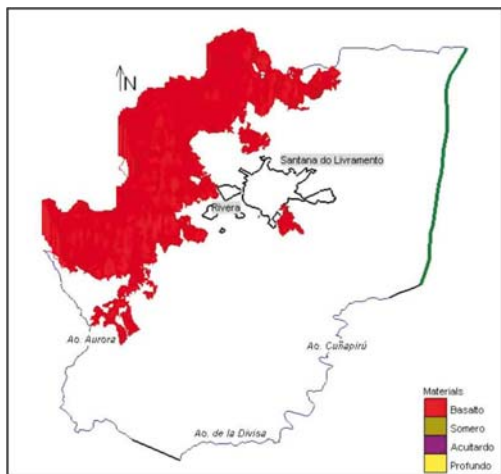
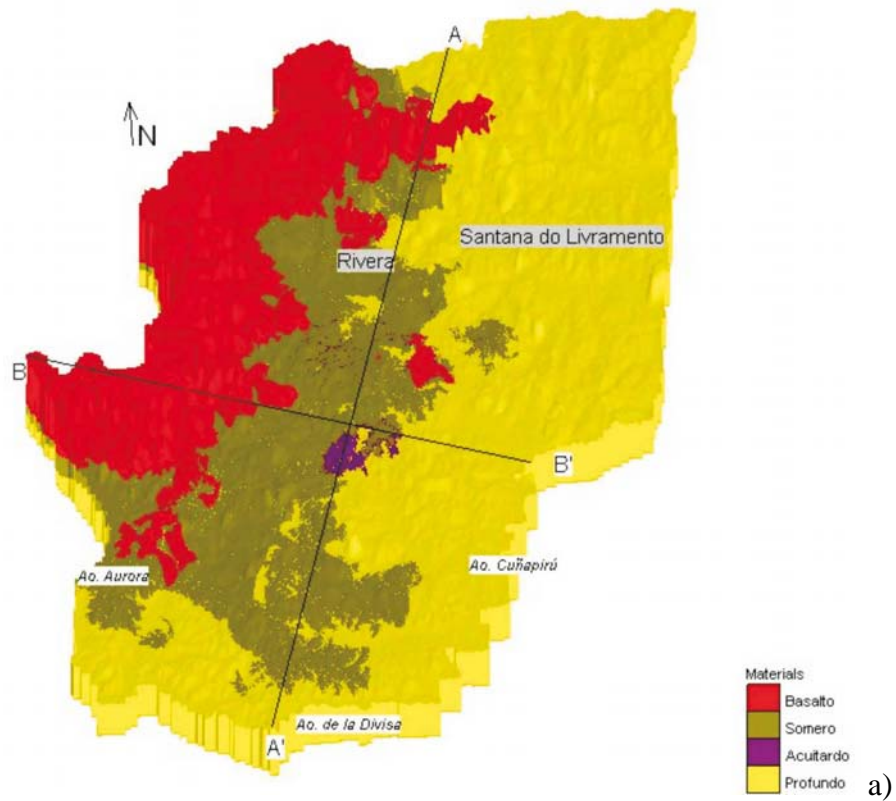


Figura 6.5: a) Sólido interpolado a partir de la información de las perforaciones de la zona. b) Basaltos. c) Acuitardo más acuífero profundo.

La Figura 6.6 muestra dos perfiles típicos en los cuales se identifican las cuatro formaciones. La ubicación de los perfiles se muestra en la Figura 6.5a. El modelo estratigráfico representa en forma adecuada el relevamiento superficial de basaltos, y además, tal lo planteado en el modelo conceptual, el acuífero somero no se extiende a territorio brasileiro.

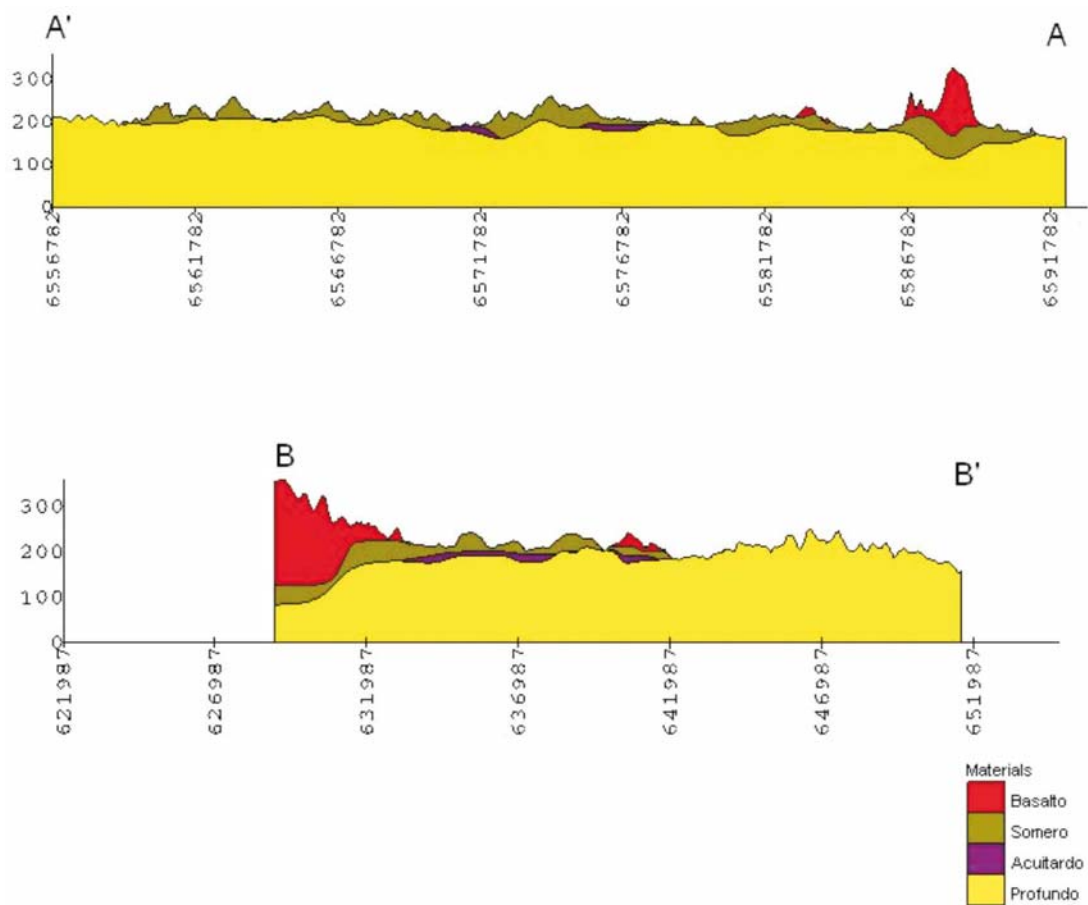


Figura 6.6: Perfiles típicos del modelo estratigráfico (escala exagerada en vertical).

#### 6.3.4. Discretización Espacial.

El modelo estratigráfico sirvió de base para la generación de la malla tridimensional en diferencias finitas. La misma consta de 156 filas y 137 columnas de 250 m en ambas direcciones “x” e “y”, tamaño que se considera adecuado teniendo en cuenta la densidad de información disponible. En vertical se representaron cuatro capas en coincidencia con las unidades acuíferas definidas en el modelo conceptual representadas en la estratigrafía generada. El tamaño de las celdas en la dirección “z” coincide con el espesor de la unidad hidrogeológica a la que pertenece la celda, previamente definida en el sólido. De acuerdo a la convención de MODFLOW las celdas ubicadas fuera de los límites del modelo corresponden a celdas inactivas, es decir no se calcula ni la carga hidráulica ni los flujos. En concordancia con la Figura 6.5, la malla de la capa de basaltos cubre parcialmente la

superficie simulada (Figura 6.7) al igual que la del acuífero somero (Figura 6.8) y la del acuitardo (Figura 6.9). En cambio sólo el acuífero profundo cubre toda el área modelada (Figura 6.10).

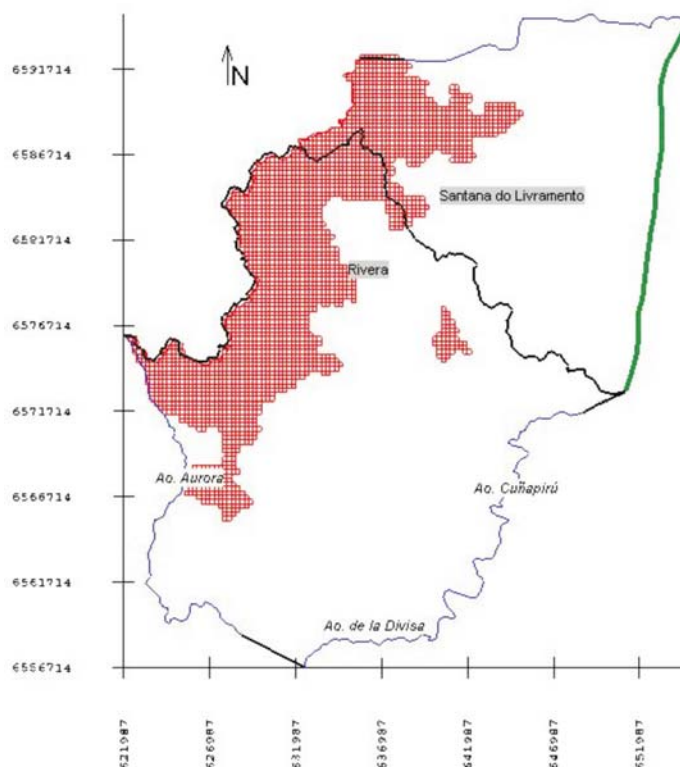


Figura 6.7: Discretización espacial de la capa 1, basaltos.

Como puede observarse en la Figura 6.9, la capa 3 está compuesta tanto por celdas de material acuitardo como de acuífero somero, esto se debe a un requerimiento de MODFLOW para dar continuidad a las capas cuando se utiliza el paquete LPF. Por lo tanto el área no ocupada por el acuitardo se definió como acuífero somero para respetar la información de espesores surgida del análisis de las perforaciones.

El número de celdas activas en el acuífero profundo es de 12146, en el acuífero somero como el acuitardo de 6195 y en los basaltos de 2606. El utilizar un número variable de celdas por capas resulta una ventaja conceptual comparativa dada la presencia de formaciones con una extensión geográfica muy dispar.



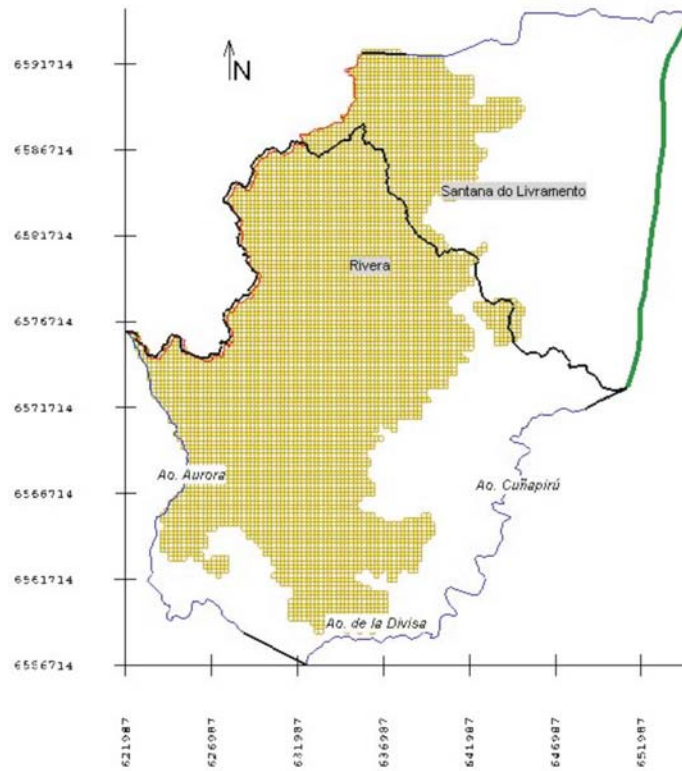


Figura 6.8: Discretización espacial de la capa 2, acuífero somero.

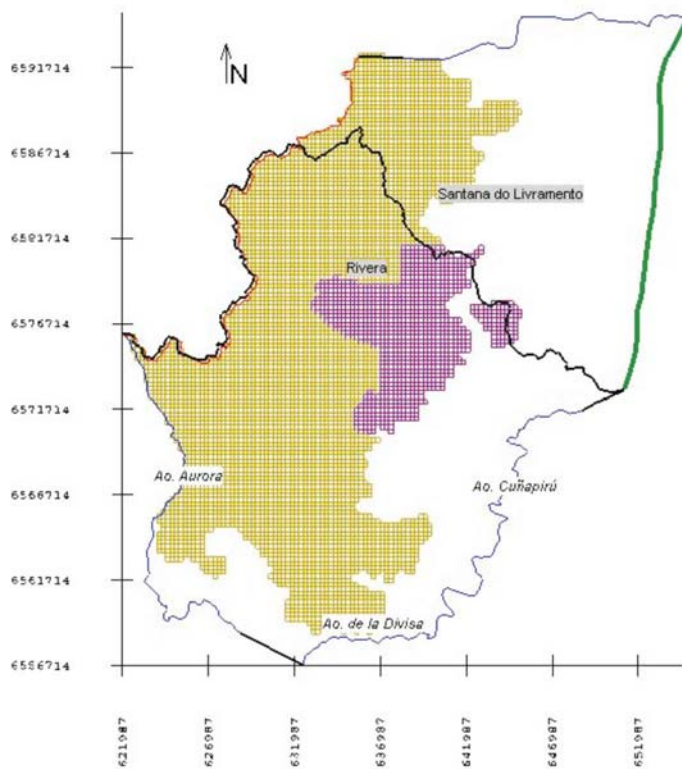


Figura 6.9: Discretización espacial de la capa 3, acuífero somero y acuitardo.

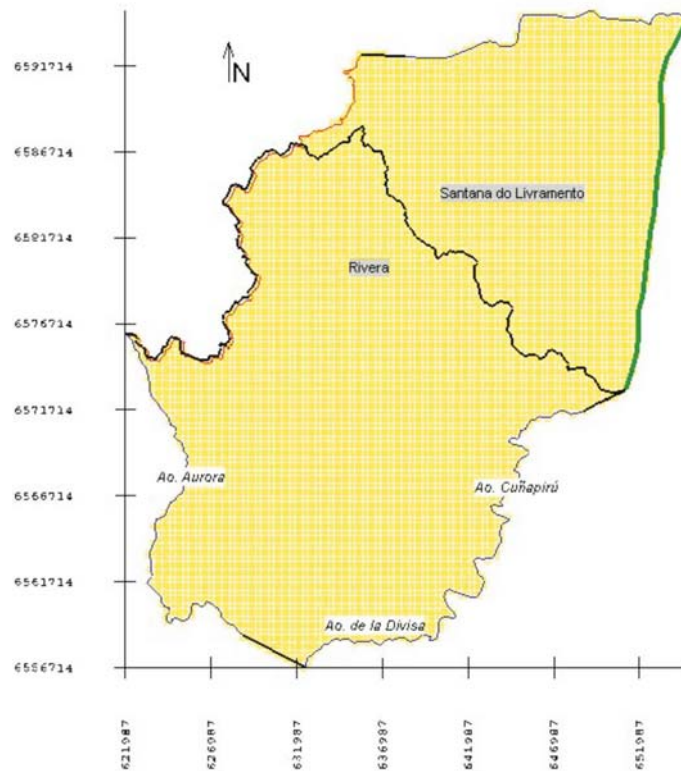


Figura 6.10: Discretización espacial de la capa 4, acuífero profundo.

En cuanto a sus condiciones hidrogeológicas todas las capas se modelaron como convertibles, es decir que dependiendo si la carga hidráulica simulada está por encima o por debajo del tope de la capa, la misma puede ser libre o confinada, mientras que la capa 3 se configuró como confinada estricta.

### 6.3.5. Condiciones de contorno de carga hidráulica prescrita y flujo prescripto.

Las condiciones de borde heredan la incertidumbre consecuencia de la falta de información de campo cercana a los bordes. El borde de basaltos en el sector Oeste fue representado por una condición de flujo nulo mientras que en el borde de las areniscas por debajo del basalto (capa 2) se fijó, de acuerdo a la piezometría, una carga hidráulica variable espacialmente entre un valor de 240 m en el extremo norte decreciendo en sentido suroeste hasta 224 m. La misma condición se usó para la capa 3, mientras que en la capa 4 los valores se redujeron a 225 y 209 m, respectivamente, en concordancia con el modelo hidrogeológico que indica la existencia de un flujo vertical descendente entre dichas capas.

El borde este en territorio brasilero se simuló con flujo prescripto. Para calcular las tasas de flujo primero se realizó una simulación con carga hidráulica prescrita, cuyos valores se ubicaron aproximadamente 2 m por debajo de la cota del terreno, siguiendo la tendencia del perfil topográfico en la zona. Luego, los flujos resultantes de esa corrida en dicho borde se impusieron como condición de borde en las sucesivas simulaciones.

La Figura 6.11a muestra todas las condiciones de borde implementadas en el acuífero profundo y en el somero, mientras que la Figura 6.11b compara los bordes actuales del modelo con los implementados en el modelo de Rodríguez et al. (2006).

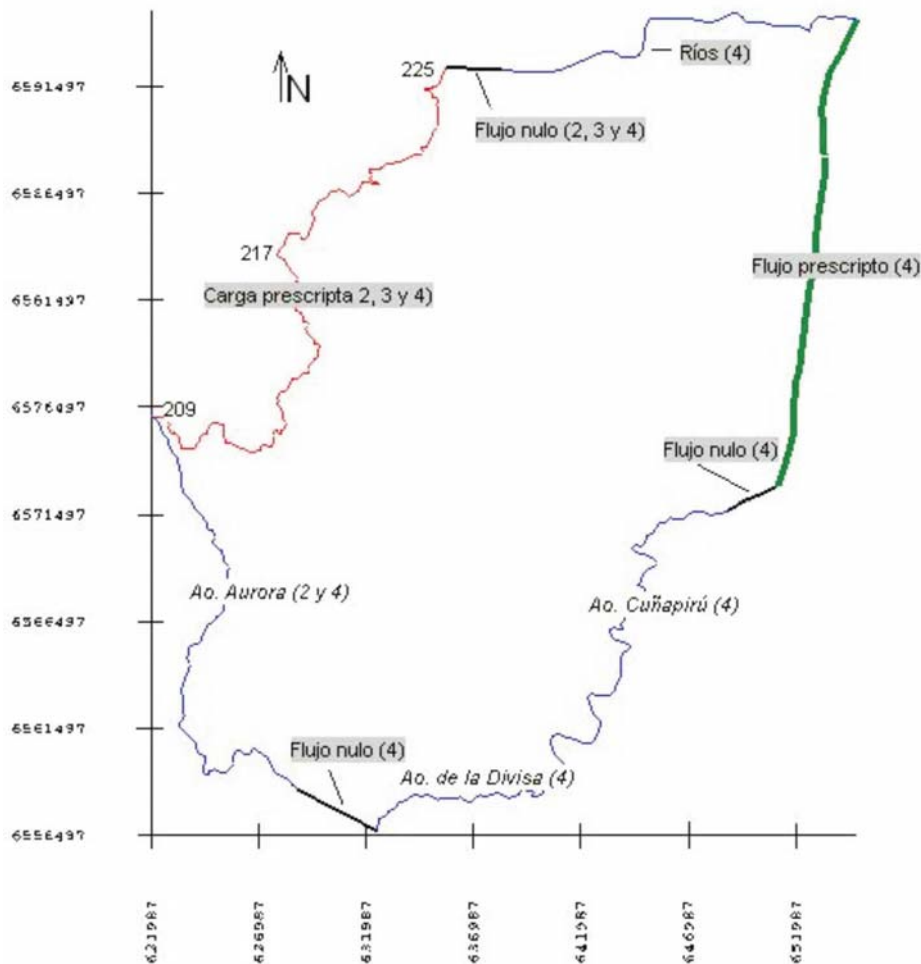


Figura 6.11a: Condiciones de borde empleadas en las capas 2, 3 y 4, según correspondiera, indicadas entre paréntesis.

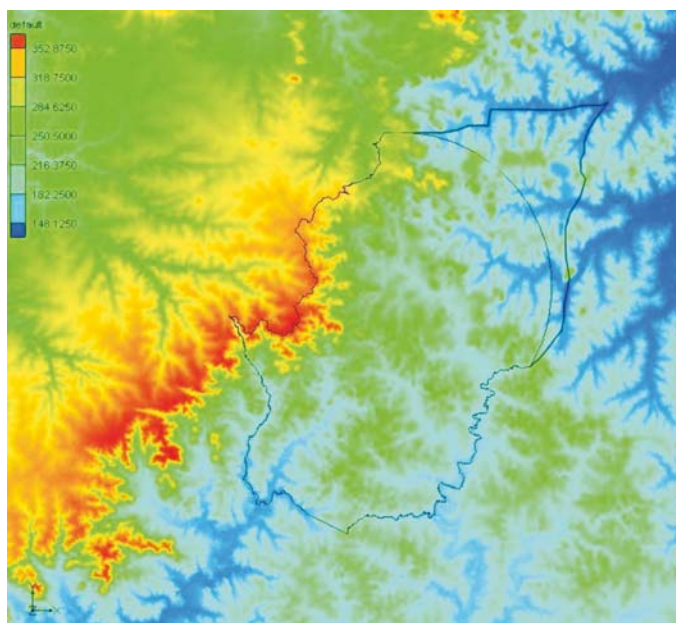


Figura 6.11b: Límite del modelo de Rodríguez et al. (2006) y límite actual, superpuestos al modelo digital del terreno.

### 6.3.6. Condiciones de contorno de ríos.

Los ríos del borde simularon condiciones de carga hidráulica constante en el tiempo, pero variable en el espacio. Dado que no se disponía de informaciones hidrométricas suficientes, es decir caudales y/o tirantes, ni de las características geométricas de ninguno de los ríos simulados, se utilizó el módulo RIVER de MODFLOW que requiere escasa información (Mc Donald and Harbaugh, 1998). Los datos de entrada incluyeron la cota del pelo de agua, la conductancia de los sedimentos del fondo del río y la cota de la base de dichos sedimentos. En las nacientes de los arroyos se asumió que ambas cotas eran iguales, en las zonas más bajas éstas difieren en un máximo de 0,5 m. En términos de flujo se buscó reproducir un flujo de intercambio agua subterránea / agua superficial simulado nulo o bajo en los tramos de aguas arriba, mientras que en las zonas menos elevadas los arroyos deberían constituir vías de drenaje del agua subterránea. En su estado actual el modelo simula el flujo base pero no los flujos superficiales rápidos.

La Figura 6.12 muestra todos los ríos y arroyos simulados, no contándose con la toponimia de los ríos del sector brasilero. En la Tabla 6.1 se listan los ríos considerados, la

capa del modelo que atraviesan y la conductancia resultante de la calibración.

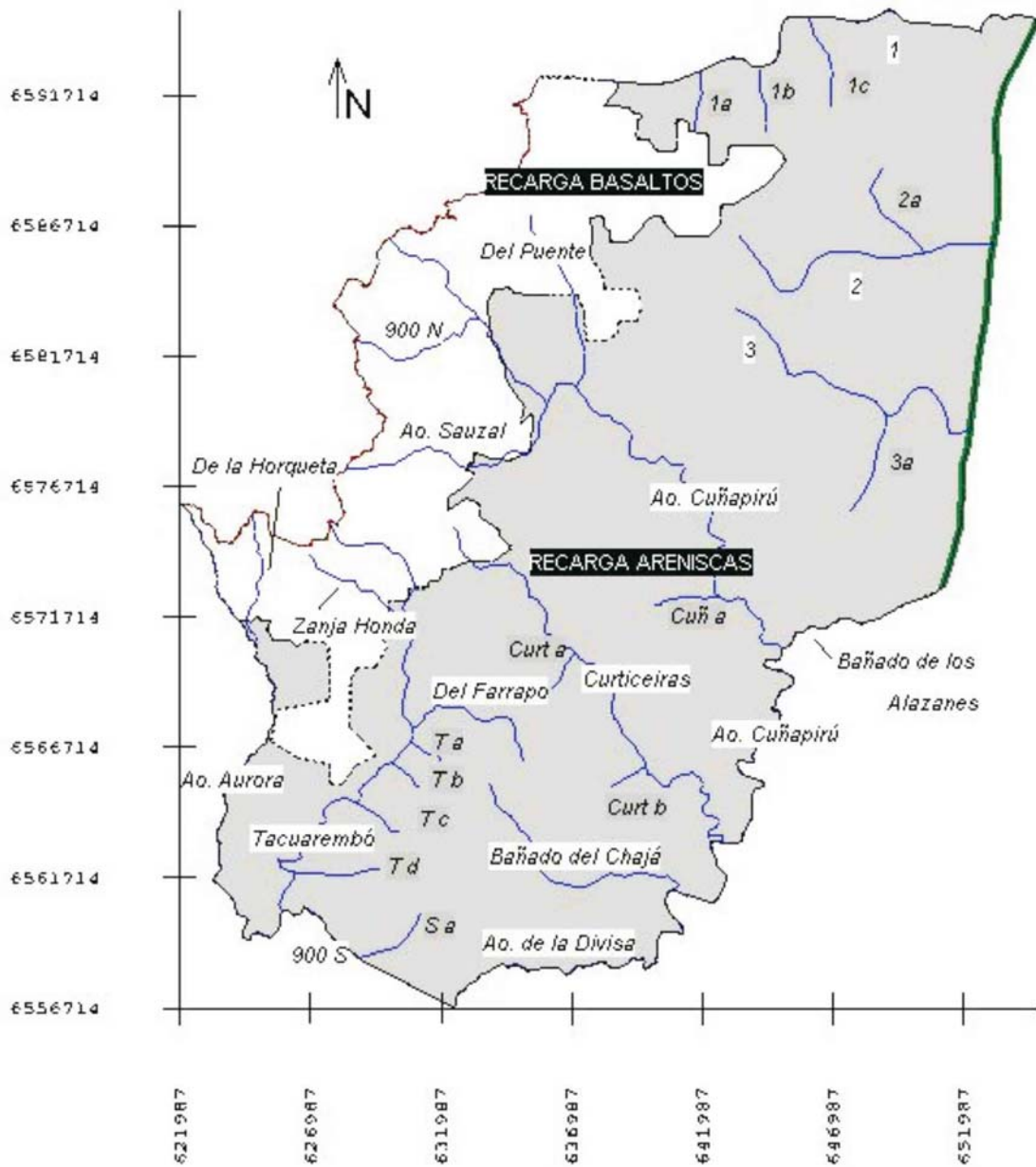


Figura 6.12: Ríos y arroyos simulados en el modelo y zonas de recarga.

Tabla 6.1: Ríos simulados

Nombre del río	Situación	Conductancia (m <sup>2</sup> /d/m)	Capa que ocupa
Cuñapirú	Interno/ borde	1	1 - 4
Ao. Aurora	Borde	1	1 - 4
Del Puente	Interno	1	1 - 2
Sauzal	Interno	1	1 - 2
Bañado de los Alazanes	Borde	1	4
Curticeiras	Interno	1	2 - 4
Tacuarembó	Interno	1	1 - 4
Zanja Honda	Interno	1	1
De la Horqueta	Interno	1	1 - 2
Del Farrapo	Interno	1	2
Bañado del Chajá	Interno	1	2 - 4
De la Divisa	Borde	1	4
900 N	Interno	1	1
900 S	Borde	1	4
S a	Interno	1	4
Río brasileiro 1	Borde	1	2 - 4
1 a	Interno	1	4
1 b	Interno	1	4
1 c	Interno	1	4
Río brasileiro 2	Interno	1	4
2 a	Interno	1	4
Río brasileiro 3	Interno	1	4
3 a	Interno	1	4
Cun a	Interno	1	4
Curt a	Interno	1	4
Curt b	Interno	1	4
T a	Interno	1	2
T b	Interno	1	2
T c	Interno	1	4
T d	Interno	1	4

### 6.3.7. Recarga / evapotranspiración.

La recarga se introdujo en dos áreas diferenciadas, una sobre los basaltos y otra sobre las areniscas aflorantes, sin definir una tasa de recarga diferente entre acuífero somero y profundo (Figura 6.12) y sin sustraer áreas urbanas impermeabilizadas. La tasa de recarga sobre las areniscas se definió durante el proceso de calibración, tomando como punto de partida el valor promedio obtenido mediante el balance hídrico presentado en el Capítulo 4. La tasa resultante sobre los basaltos fue de 21,9 mm/año y sobre areniscas de 156,95 mm/año, equivalentes a 1,35 % y 9,60 %, respectivamente, de la precipitación

media anual de 1.639 mm estimada en la estación Rivera por la Dirección Nacional de Meteorología del Uruguay.

Las posibles pérdidas por evapotranspiración de agua subterránea, en este caso a partir de las areniscas, no fueron explícitamente representadas. Tampoco se incluyó el aporte de agua proveniente del escurrimiento superficial rápido (de carácter perenne o intermitente) que podría recargar los acuíferos en la estación lluviosa. Futuras mejoras del modelo podrían incluir la evapotranspiración en forma explícita y una representación sencilla de los volúmenes infiltrados por escurrimiento rápido.

#### **6.3.8. Bombeo.**

En la Tabla 6.2 se incluyen los pozos de bombeo simulados, sus coordenadas y los caudales de bombeo correspondientes. Los pozos fueron asignados a la capa somera o profunda según que la profundidad de captación estuviera por arriba o por debajo de los 170 m de profundidad, respectivamente. Esta profundidad aproximada fue definida en el modelo conceptual como la transición entre capas en la zona de Rivera y extrapolada a todo el dominio (Rodríguez et al., 2006). Además, entre los pozos que explotan el acuífero somero también se diferenciaron aquellos correspondientes a la capa 2 o a la capa 3, comparando la profundidad del pozo o del área filtrante, si se contaba con ese dato, con la cota altimétrica donde se producía el contacto entre estas dos capas en el sólido.

No fue posible clasificar claramente todos los pozos disponibles; además es sabido que algunos de ellos captan de ambas formaciones, por lo tanto el bombeo en cada capa es una aproximación a la extracción real. Debido a las suposiciones que debieron realizarse para determinar la magnitud de la extracción, se presume que el bombeo simulado subestima el bombeo real. Sin embargo, el porcentaje de población servida por sistemas de redes cloacales ronda el 50%, por ende las pérdidas en la red de abastecimiento podrían recargar localmente el acuífero compensando parcialmente la subestimación de la explotación.

Tabla 6.2: Pozos de bombeo simulados en el modelo.

Nombre del Pozo	Coordenadas		Caudal (m3/d)	Capa donde se asignó
	x	Y		
10.4.015	638795.72	6576267.15	-132	2
Sagr-69	635322.9	6578586.32	-24	2
Sagr-48	633344.54	6576857.84	-144	2
Sagr-41	633649.53	6572685.09	-480	2
Sagr-40	635165.87	6574218.56	-12	2
Sagr-39	635479.8	6575515.01	-144	2
Sagr-36	636160.01	6578327.34	-168	2
Sagr-35	636252.35	6578546.32	-168	2
Sagr-34	639874.43	6579707.2	-96	2
Sagr-64	640236.6	6566924.7	-54	2
Sagr-16	635008.07	6570710.69	-43.2	2
Sagr-14	638546.4	6571522.43	-384	2
Sagr-9	638706.05	6576130.18	-122.4	2
10.4.026	641965	6580065.67	-48	2
1368/2	638498.89	6576391.39	-43.2	2
1367/2	638736.4	6577741.68	-9.12	2
10.4.009	639033.65	6576590.99	-105.12	2
10.4.025	634037.29	6583329.23	-446.4	3
10.4.018	633824.9	6583665.91	-376.8	3
10.4.017	633415.46	6583241.17	-780	3
Sagr-20	625581.1	6565313.2	-60	3
Sagr-68	634289.46	6566199.01	-24	3
Sagr-65	633096.97	6562252.4	-60	3
10.4.023	634279.66	6584164.77	-936	3
RE3	638997.52	6584603.12	-2400	4
Prado1	639272.48	6584210.44	-3120	4
724/2	637714.32	6582556.12	-540	4
PT0005	640598.96	6575974.99	-100.8	4
PT0007	641395.22	6579143.79	-240	4
Laideal	639578.06	6579909.06	-86.4	4
MontePaz	638523.93	6574024.4	-144	4
10.4.007	633332.73	6583939.06	-864	4
10.4.036	633375.83	6583297.68	-1344	4
Lavadero	640218.58	6580264.59	-141.6	4
Vertedero	640204.51	6576418.88	-168	4
AC2	639322.69	6582149.57	-480	4
Sagr-11	625581.1	6565313.2	-168	4
Sagr-12	640659.96	6570019.8	-144	4
Sagr-19	634197.32	6571559.33	-360	4
Sagr-15	640531.93	6570201.16	-120	4
Sagr-17	634775.47	6568613.46	-360	4
Sagr-18	632214.04	6560122.23	-64.8	4
Sagr-44	643312.91	6576564.75	-144	4
Sagr-45	644105.28	6576112.03	-60	4
Sagr-57	636631.79	6568293.46	-144	4
Sagr-38	639044.09	6580596.04	-105.6	4
VilaUmb	641093.49	6580833.44	-363.12	4



Tabla 6.2: Pozos de bombeo simulados en el modelo. (Continuación)

Nombre del Pozo	Coordenadas		Caudal (m3/d)	Capa donde se asignó
	x	Y		
AL1	644971.54	6583484.99	-960	4
Wilson3	644098.83	6584498.65	-960	4
SimonBolivar	642775.66	6585218.9	-480	4
Ke2	642052.64	6583199.55	-1680	4
Br1	643345.69	6583090.69	-1200	4
H10	641068.52	6581017.86	-1200	4
JardimdoVerde	642054.07	6580813.44	-1440	4
724/1	637808.13	6582074.17	-859.2	4
1226/5	638710.5	6581653.51	-336	4
1226/6	638921.75	6579448.5	-120	4
10.4.001	636542.35	6582731.7	-405.6	4
10.4.002	635808.86	6583001.74	-259.2	4
10.4.003	637792.57	6582091.35	-1350	4
10.4.004	639816.31	6580159.78	-528	4
10.4.005	637906.17	6583009	-1099.2	4
10.4.008	638682.62	6579527.05	-160.8	4
10.4.011	637167.91	6581396.13	-696	4
10.4.012	637877.43	6577734.93	-60	4
10.4.021	635895.7	6577525.92	-84	4
1508/6	639086.8	6576761	-79.2	4
10.4.019	640990.89	6579668.19	-132	4
10.4.022	641730.72	6579660.23	-30	4
10.4.016	633000.47	6583910.63	-1440	4
10.4.020	638251.4	6577643.91	-6	4
10.4.027	637800.93	6576890.29	-270	4
10.4.028	641139.7	6579779.32	-230.4	4
10.4.029	642280.65	6579757.59	-321.6	4
10.4.030	638823.85	6577110.19	-268.8	4
10.4.031	638167.39	6583520.66	-720	4
10.4.034	639593.13	6577348	-296.64	4
10.4.033	641933.62	6580117	-600	4
AC1	644977.5	6583480.93	-1440	4
BR2	643164.1	6583218.17	-960	4
RE2	639106.44	6584720.9	-1920	4
H11	641083	6580889	-960	4
AR3	643879.5	6580587	-960	4
SantaRita	637790.3	6587488	-888	4
1041	643344.17	6579623.87	-1118.4	4
AC4	639570.11	6582091.22	-1800	4
VilaLuiza	642298	6580441	-960	4
W1	643893.6	6583481.58	-360	4
Ke1	641903	6583032	-720	4
Ar4	643848	6580461.4	-1560	4
Ar5	643727.9	6580901.6	-840	4
BR3	643358.6	6583011.4	-960	4
BR4	642757.71	6583295.8	-1560	4
RE1	638898.5	6584541	-1440	4
AC3	639623.2	6582191.6	-1440	4
H2	640682.77	6580676.4	-1920	4
H3	640273.25	6580995.8	-720	4
H4	640737.77	6580490.83	-960	4
H5	640973.4	6581206.2	-2160	4
H6	640732.85	6580590.9	-960	4
h7	640661.9	6580591.6	-1200	4

Tabla 6.2: Pozos de bombeo simulados en el modelo. (Continuación).

Nombre del Pozo	Coordenadas		Caudal (m <sup>3</sup> /d)	Capa donde se asignó
	x	Y		
Lta1	640348.6	6582050.85	-840	4
ltc1	640118.7	6581961.3	-960	4
cce3	644788.23	6581781	-1440	4
lta2	640298.3	6582091.4	-768	4
cce5	644158.41	6582070.9	-720	4
prg1	642188.3	6583160.95	-360	4
cce6	644352	6581981.73	-960	4
ar2	644023.2	6580841.45	-2376	4
jf1	637858.6	6584171.4	-36	4
apm1	638338	6585331	-72	4
ct1	642198	6583221	-96	4
re1	638899	6584541	-895.2	4
j11	642858.2	6585481.5	-36	4
cf1	638647.9	6585411.76	-120	4
lb1	642018.62	6585511.5	-24	4
fjml	638198.65	6585661.55	-36	4
rds1	641938.41	6585491.4	-72	4
hm1	643468.5	6585230.9	-158.4	4
pp1	647247.8	6585536.3	-144	4
em1	638228.6	6584541.4	-28.8	4
jm1	644057.78	6584056.76	-96	4
cidade	643859.86	6584806.8	-36	4
psj1	638698.1	6581991.6	-100.8	4
al2	645347.7	6583320.96	-201.6	4
7rcmec1	640698.3	6582861	-214.08	4
cce7	644198.25	6581591.5	-1440	4
scs2	638247.7	6584551	-240	4
Sagr-8	639333.66	6576843.34	-240	4
Sagr-13	638425.67	6571453.74	-156	4

Para calcular el retorno por bombeo se consideraron todos los pozos identificados, aunque no se ubiquen en el área urbana propiamente dicha, aportan a dicha zona y es allí donde se producen los retornos. Solo se descontó un pequeño porcentaje del bombeo total que abastece a la zona rural.

La tasa de bombeo total en las areniscas fue de 75468,5 m<sup>3</sup>/d, a eso se le restó un 10% que es el estimado para abastecimiento rural, por lo tanto el bombeo corregido resultó en 67921,6 m<sup>3</sup>/d. Se estima que aproximadamente 30 % de dicho bombeo (20376,5 m<sup>3</sup>/d) retorna al medio subterráneo. Si se considera un área urbana de aproximadamente 46,9 km<sup>2</sup>, la recarga en lámina resulta 158,7 mm/año, o sea del mismo orden de magnitud de la recarga aplicada al modelo por precipitación.

Esta tasa de recarga “por retorno” de los pozos de bombeo, es decir lo que regresa al sistema subterráneo a partir del riego o por pérdidas en las cañerías y o en los pozos negros, no se consideró explícitamente ya que su valor resultó del mismo orden de magnitud que la recarga pluviométrica en el área urbana si ésta no fuera casi impermeable.

La Figura 6.13 muestra la ubicación de los pozos de bombeo simulados en cada capa. Se observa la gran concentración de pozos en torno a la planta urbana de ambas ciudades.

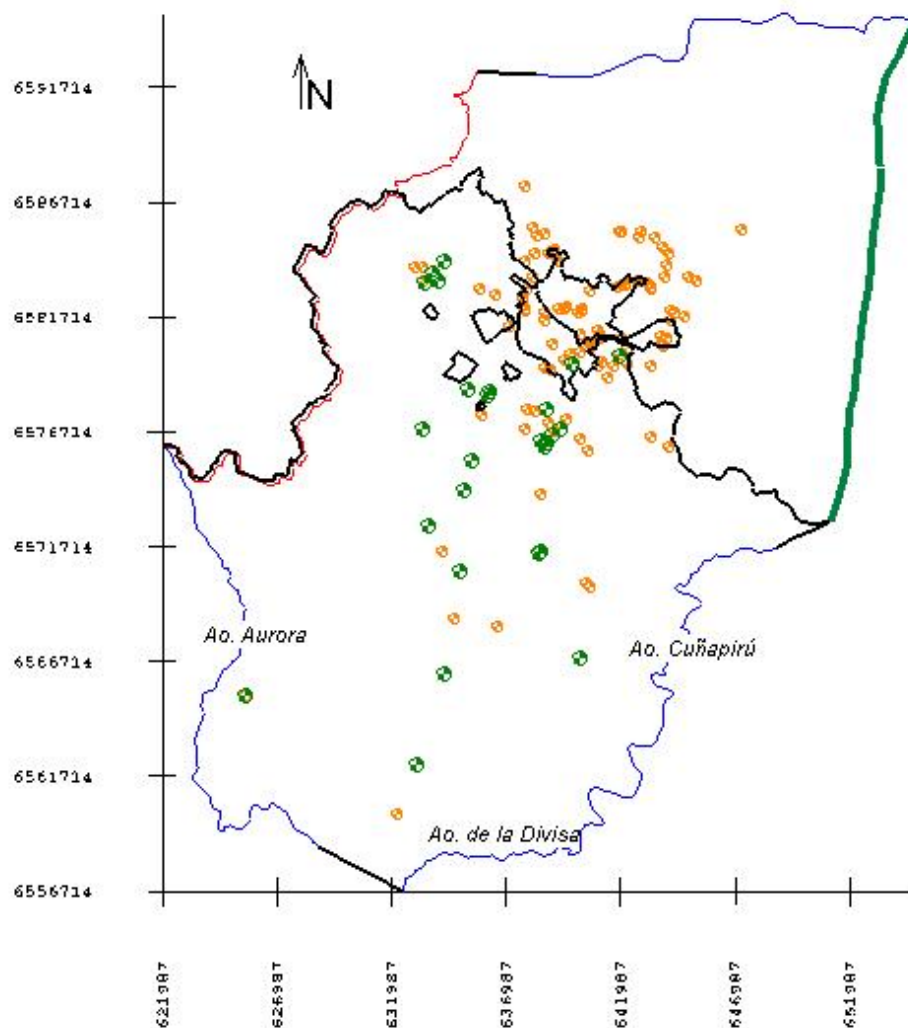


Figura 6.13: Pozos de bombeo simulados. Los símbolos claros son los pozos que explotan del acuífero profundo y los oscuros del somero.

#### **6.4. Estrategia de calibración.**

El modelo se calibró en estado estacionario buscando reproducir las condiciones de escurrimiento al momento de las mediciones de campo (años 2004 - 2005). La calibración se realizó por el método de prueba y error, comparando niveles piezométricos simulados y observados. En muchos de los pozos censados no se tenía certeza respecto de la profundidad del área filtrante y de las características constructivas de los mismos, por lo tanto el nivel piezométrico observado no pudo asociarse fácilmente a uno de los niveles de aporte, sino que probablemente refleje la influencia de ambos. Esta problemática dificultó el proceso de calibración, por ello se adoptó una meta de calibración de +/- 3 m del valor observado.

Los parámetros de calibración utilizados para alcanzar un ajuste aceptable entre los valores observados y simulados fueron la carga hidráulica y los flujos prescritos en los bordes, la tasa de recarga, la conductancia y cotas de los ríos y la conductividad hidráulica de las capas representadas.

Durante el proceso de calibración surgieron ciertos problemas de convergencia. El primero de ellos fue atribuible a la generación automática de la grilla tridimensional por capas a partir del sólido, que resultó que en una misma capa celdas contiguas estuvieran desconectadas hidráulicamente unas de otras, y por lo tanto a MODFLOW le resultaba imposible calcular conductancias y, por ende, flujos entre celdas. Esto se solucionó desarrollando un programa en Fortran 95 compuesto por una serie de algoritmos que comparan cotas entre celdas contiguas, redefiniéndolas hasta establecer conexión hidráulica entre ellas.

La piezometría utilizada para la calibración fue presentada y analizada en el Capítulo 3, Sección 3.4 (Figura 3.8).

## 6.5. Resultados.

### 6.5.1. Propiedades hidrogeológicas.

La Tabla 6.3 incluye los valores calibrados de la conductividad hidráulica. En el acuífero somero se utilizó una conductividad hidráulica horizontal,  $K_h$ , homogénea e igual a 1,5 m/d, mientras que en el acuífero profundo se definió una  $K_h = 1,8$  m/d en la mayor parte del área, excepto en un par de zonas de dimensiones reducidas al sur del cono de bombeo, donde se utilizó un valor de 5 m/d. Esto es consistente con el modelo conceptual, que indicaría la presencia de perforaciones en sectores de permeabilidad más elevada intercalados en una matriz de permeabilidad menor. Otra zona de conductividad diferenciada y algo menor ( $K_h = 0,4$  m/d) se utilizó en el área de Santana do Livramento, donde se detectaron las menores cotas piezométricas. Es importante remarcar que los valores de  $K_h$  utilizados están dentro del rango de valores estimados a partir de los ensayos de bombeo y de recuperación disponibles en el área de estudio (ver Figura 3.10).

De igual manera, la  $K_h$  para los basaltos está dentro del rango reportado por Flores Machado (2005).

El modelo conceptual indicó la presencia de un acuitardo de unos 20 m de espesor entre el acuífero somero y el profundo, responsable del gradiente hidráulico vertical entre ambos en un sector del área de estudio. Esta fue la capa que presentó mayor incertidumbre, ya que no se contó con estudios ni ensayos específicos en dicho material. Sin embargo, el valor de  $K_h$  calibrado (0,09 m/d) concuerda con los valores tabulados por Custodio y Llamas (1979) para materiales limo arenosos o arcillas, como los interpretados en las perforaciones del área en estudio.

Tabla 6.3: Conductividades hidráulicas calibradas.

Capa	Material	$K_h$ (m/d)	$K_v$ (m/d)	$A_h = \frac{K_{hy}}{K_{hx}}$ (adim.)	$A_v = \frac{K_h}{K_v}$ (adim.)
1	Basalto	0.168	1.68	1	0.1
2	Acuífero somero, por debajo de los basaltos	1.1	$1.1 \times 10^{-3}$	1	1000
2	Acuífero somero	1.5	$3.0 \times 10^{-3}$	1	500
3	Acuitardo	0.09	$9 \times 10^{-5}$	1	1000
4	Acuífero profundo	1.8	0.18	1	10
4	Zonas acuífero profundo	5.0 0.4	0.50 0.04	1	10

$K_h$ : conductividad hidráulica horizontal;  $K_v$ : conductividad hidráulica vertical;  $A_h$ : anisotropía horizontal (relación entre la conductividad hidráulica horizontal en las direcciones principales de anisotropía X e Y);  $A_v$ : anisotropía vertical (relación entre la conductividad hidráulica horizontal y vertical).

Se consideró una anisotropía vertical ( $K_h/K_v$ ) igual a 0.1 en los basaltos, representando la posible presencia de fracturación vertical y el consecuente camino preferencial del flujo en este sentido. En cambio, en el acuífero profundo la anisotropía fue de aproximadamente 10. Por otra parte, la colada basáltica ubicada sobre las areniscas podría alterar el primer metro del acuífero somero, reduciendo su permeabilidad. Estas dos características justifican el uso de una K equivalente algo menor en la segunda capa acuífera en contacto con los basaltos.

### 6.5.2. Piezometría calculada.

La Figura 6.14 muestra las líneas piezométricas simuladas en el acuífero profundo. Dada la escasa información de campo disponible y las características litológicas, no fue posible el trazado confiable de líneas piezométricas observadas continuas en el resto de las capas, por ende no se presentan en dicha figura

En el acuífero profundo el modelo reproduce en forma adecuada los patrones generales de flujo observados, con la presencia de un cono de marcadas dimensiones producido por el bombeo en Rivera-Santana, y arroyos que, en general, drenan el sistema

subterráneo. Las mayores cargas hidráulicas (del orden de los 220 m) se encuentran en el sector oeste, con un gradiente general del escurrimiento subterráneo en sentido este y sureste, y las más bajas rondan los 135 m.

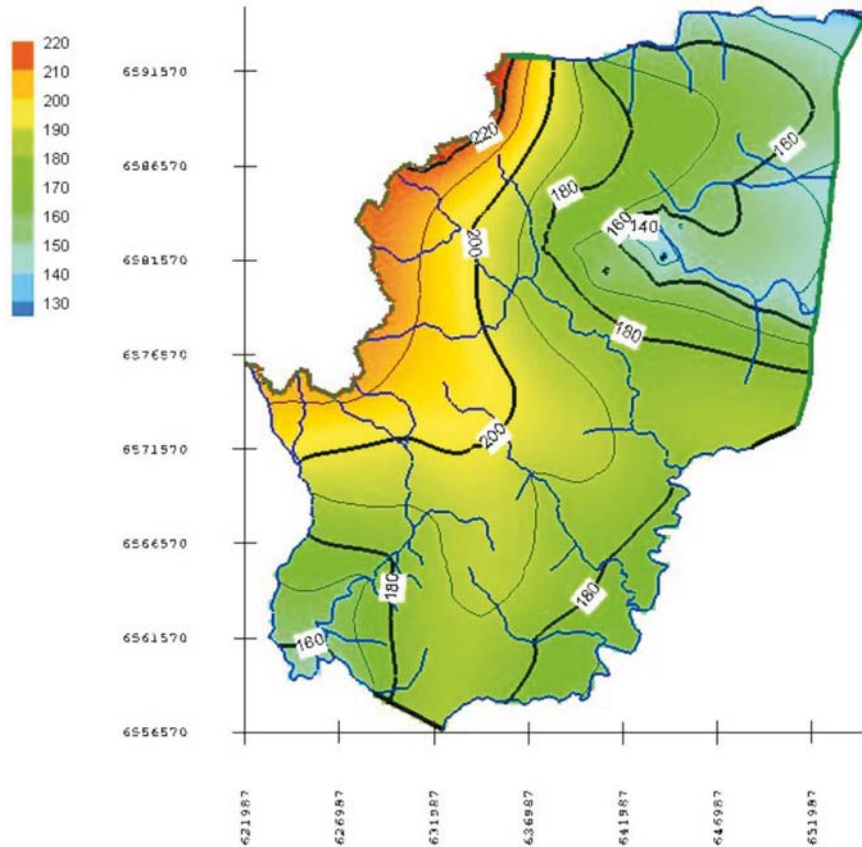


Figura 6.14: Piezometría simulada en la capa 4, acuífero profundo.

Aunque no se muestre el modelo arroja varias celdas inundadas, atribuibles a los marcados gradientes topográficos en los valles o las cercanías de los ríos. El tamaño de celda utilizado hace que la carga hidráulica simulada no sea capaz de captar dichos cambios en el modelo digital del terreno provocando estas zonas inundadas. El número de celdas afectadas es del orden del 9 % del total de celdas simuladas en la capa 4, que en promedio presentan 2 a 5 m de agua por encima de la cota superior de cada celda, con valores máximos registrados de 27 m en el sector centro-este donde se produce la transición de condición de borde de flujo prescripto hacia flujo nulo y carga hidráulica variable (Arroyo Cuñapirú), siendo esto un problema de carácter netamente local.

Por otra parte se realizó una evaluación puntual de la calibración comparando los

niveles simulados con los niveles piezométricos observados colectados durante las campañas de medición y la información aportada por el otro proyecto del Fondo de Universidades que trabajó en la zona. Este tipo de análisis debe realizarse con cuidado ya que la ubicación del punto observado rara vez coincide con la ubicación del nodo de la malla de cálculo, pudiendo producirse diferencias importantes en zonas con elevados gradientes. La Figura 6.15 muestra la comparación entre la carga hidráulica simulada y la observada en la capa 2 (acuífero somero) utilizando barras de error. El centro de la barra corresponde a la carga hidráulica observada,  $h_{obs}$ , la parte superior a  $h_{obs}$  más 3 m, la parte inferior a  $h_{obs}$  menos 3 m. Si el error está dentro de los  $\pm 3$  m la barra es verde, si está fuera de los 3 m pero menor de 6 m (200 %) la barra es amarilla (aceptable) y si es mayor es roja. La flecha hacia arriba indica sobreestimación, hacia abajo subestimación. Como se explicó, una meta de calibración de 3 metros se consideró aceptable debido a la incertidumbre en las mediciones y a la escasez de la información de campo disponible.

En la Figura 6.15 es posible observar que las barras rojas se encuentran en interfluvios, es decir zonas más altas que actúan de divisorias de aguas, y al tratarse de pozos someros o poco profundos la subestimación podría deberse a que dichos pozos extraen agua de acuíferos “colgados” y no precisamente del acuífero somero simulado, de carácter continuo. En la zona sur la subestimación podría explicarse por el hecho que los pozos de observación se localizan en celdas que se secaron en la simulación. La sobreestimación de niveles se da en la zona que sobreyace el acuitardo, el que debido a su baja conductividad hidráulica vertical produciría la elevación de la carga en la capa suprayacente.



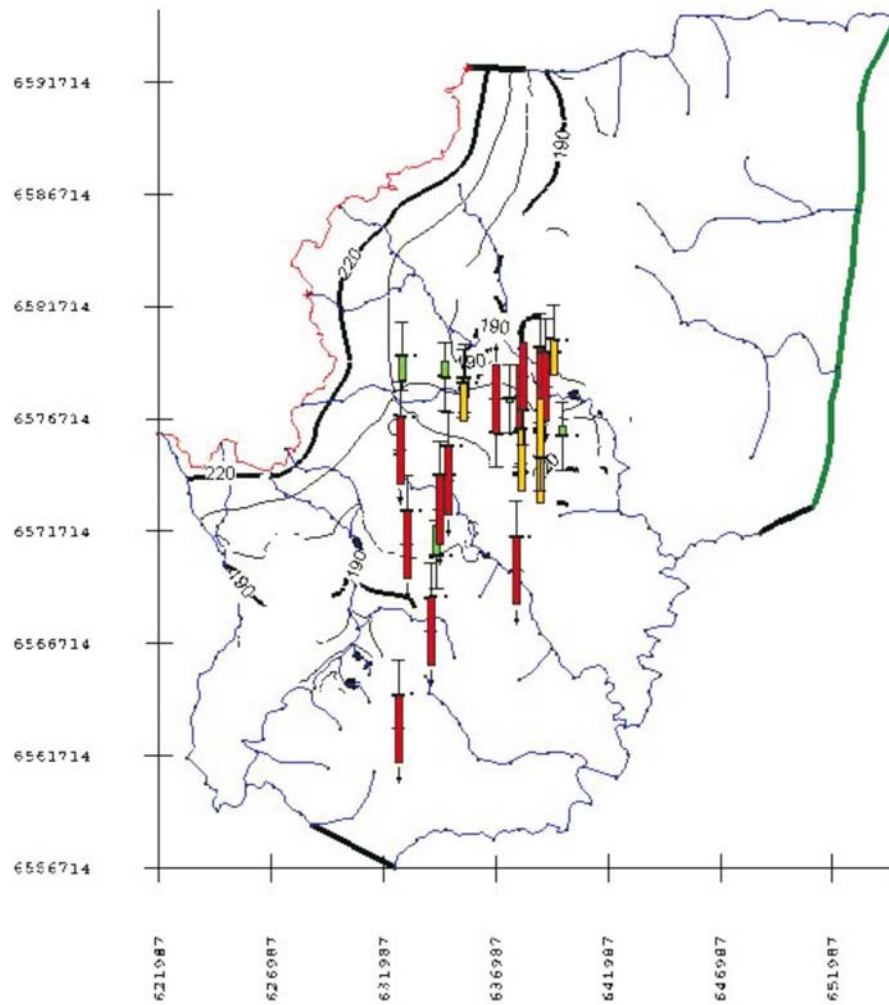


Figura 6.15: Comparación de la carga hidráulica simulada vs. observada en la capa 2 (acuífero somero) mediante barras de error.

En la Figura 6.16 se muestran las barras de error para la capa 3 (somero + acuitado). De los 10 pozos con NE observado, algunos arrojaron errores extremos de  $-15$  a  $25$  m, atribuibles a causas similares a las descritas.

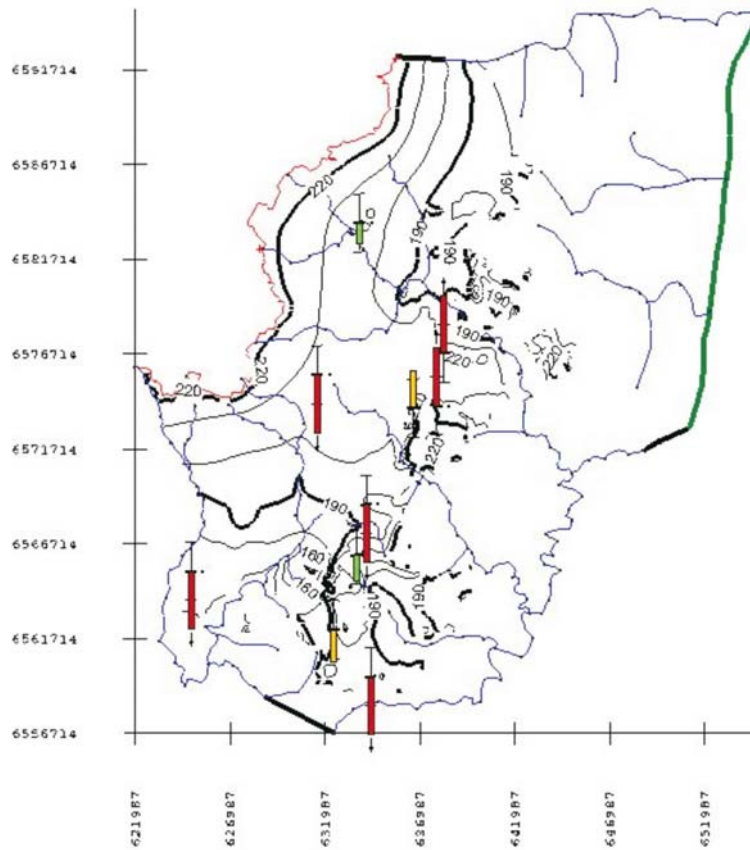


Figura 6.16: Comparación de la carga hidráulica simulada vs. observada en la capa 3 (acuífero somero + acuitardo) mediante barras de error .

La capa 4 es la de mejor ajuste (Figura 6.17), identificándose sectores bien diferenciados. En la zona del cono y al sur del mismo, en la margen izquierda del A° Cuñapirú, los valores simulados están dentro de la meta de calibración, excepto en un par de puntos. Al oeste del cono hay una sobrestimación en algunos pozos (no mayores a 7 m de diferencia), subestimación cercana a los 16 m pero en la mayoría de los puntos la representación se considera aceptable. En la zona sur del área modelada, alejada del cono, los valores de la carga hidráulica también presentan comportamientos dispares, posiblemente debido a la distribución homogénea y a un valor un tanto bajo de la conductividad hidráulica definida en el sector, así como también a la incertidumbre asociada a la representatividad de los niveles estáticos observados. Por otro lado, la densidad de pozos de muestreo en dicha área es escasa y no se cuenta con determinaciones de parámetros hidrogeológicos.

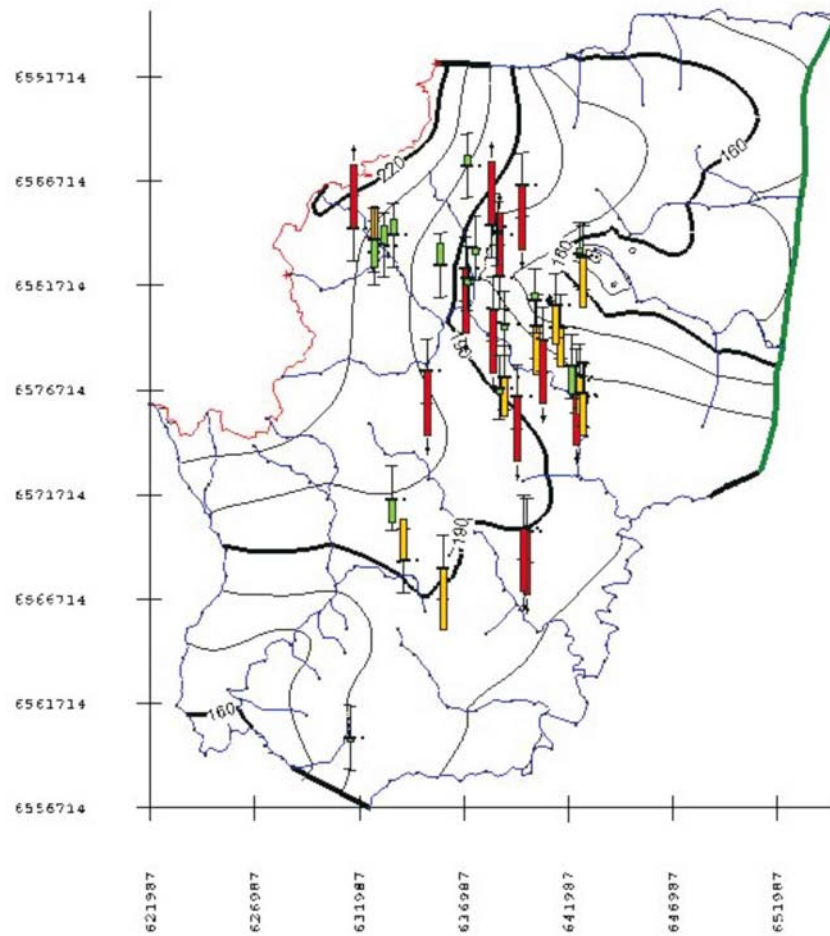


Figura 6.17: Comparación de carga hidráulica simulada vs. observada mediante barras de error en la capa 4 (acuífero profundo).

En la Figura 6.18 se presentan los niveles observados vs. los calculados para las capas 2, 3 y 4. Como se observa el mejor ajuste se logró en el acuífero profundo.

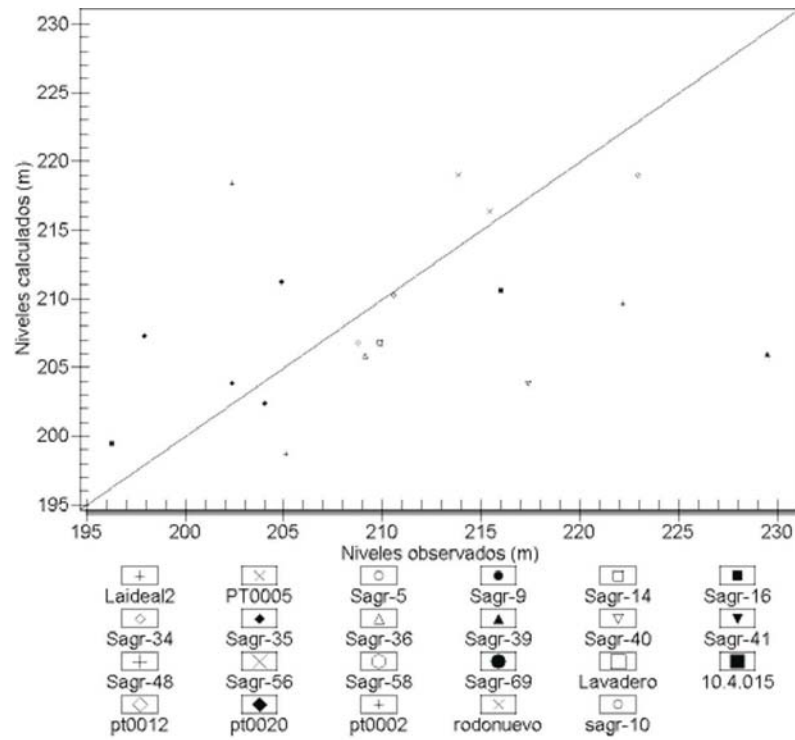


Figura 6.18a: Niveles observados vs. Simulados de la Capa 2

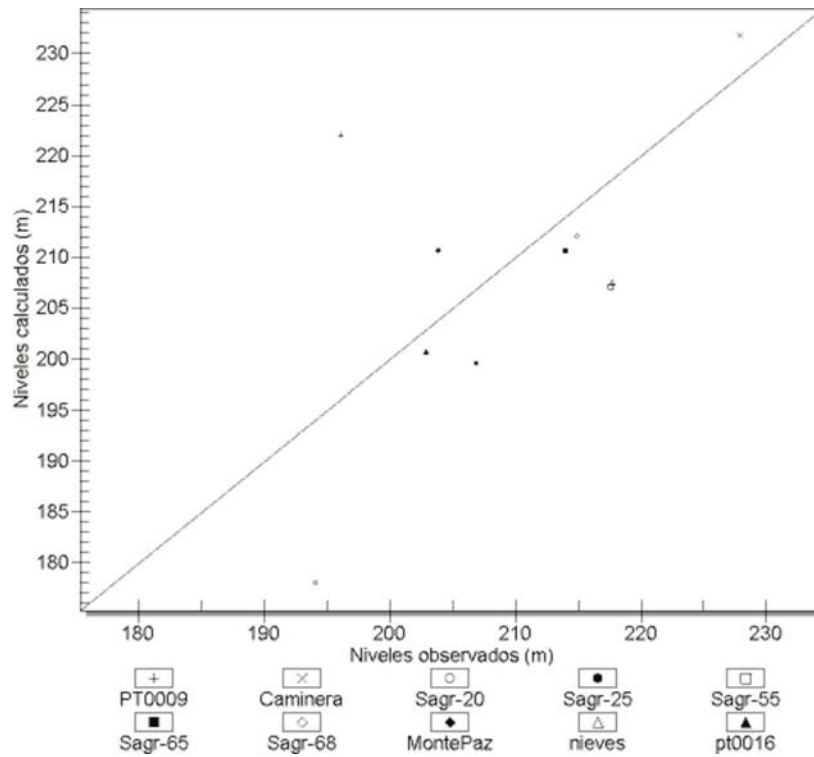


Figura 6.18b: Niveles observados vs. Simulados de la Capa 3.

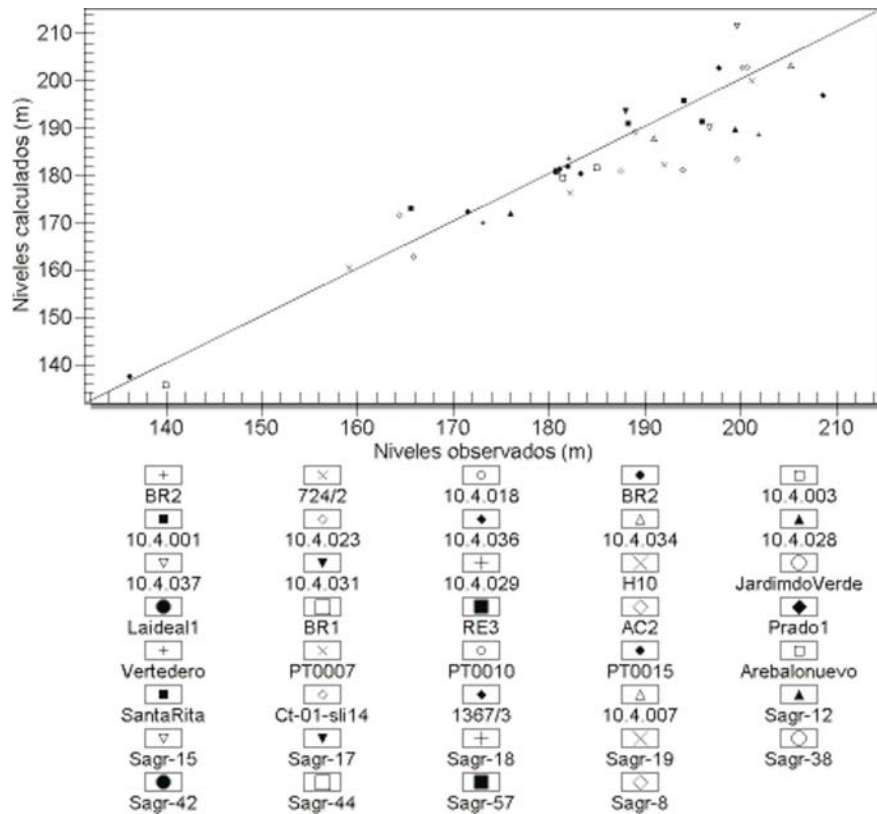


Figura 6.18c: Niveles observados vs. Simulados de la Capa 4.

Alternativamente, el ajuste del modelo puede cuantificarse mediante parámetros estadísticos que comparan los datos calculados con los datos observados (Zheng y Bennelt, 1995). El más común es el Error Medio (EM) que se define como:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)$$

donde N es el número total de puntos observados;  $cal_i$  y  $obs_i$  son los valores calculados y observados, respectivamente, en este caso nivel estático. Un valor cercano a cero indica mejor ajuste entre dichos valores, mientras que el signo del EM indica la tendencia a la subestimación (-) o a la sobreestimación (+). Sin embargo, pueden existir grandes errores positivos o negativos que se compensen, y por lo tanto este estimador pierde robustez como indicador del ajuste.

Para evitar problemas de ese tipo se utiliza el Error Medio Absoluto, definido como:

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |cal_i - obs_i|$$

Aunque con este error se pierde información acerca de la tendencia general de la nube de puntos.

Un mejor indicador del ajuste que los dos anteriores es el Error Medio Cuadrático (root mean of squared residuals errors), cuya expresión de cálculo es:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2}$$

El RMSE es similar a la Desviación Estándar cuando el EM es cercano a cero y el tamaño de la muestra (N) es grande.

En la Tabla 6.4 se presentan los errores residuales discriminados por cada capa.

Tabla 6.4: Errores por capa

<i>Error (m)</i>	<i>Capa 2 Acuífero Somero</i>	<i>Capa 3 Acuitardo</i>	<i>Capa 4 Acuífero Profundo</i>
EM	-1,865	-1,600	-2,478
EMA	6,569	8,891	4,745
RMSE	8,928	11,300	6,415

El EM en todas las capas demuestra que, en general, se están subestimando los niveles hidráulicos observados, mientras que el EMA arroja errores medios de hasta 9 metros en la capa 3, siendo menores en las otras dos capas. El RMSE también indica que la capa donde mejor ajuste se consiguió fue en la capa 4, con un error incluso menor que el obtenido en el modelo de Rodríguez et al. (2006) que fue de casi 12 m. Obtener un RMSE por debajo de los 10 m en la capa 2 se consideró un resultado aceptable teniendo en cuenta la calidad de la información piezométrica con que se contó en dicha capa.

### 6.5.3. Vectores de flujo.

Las Figuras 6.19 y 6.20 muestran los vectores de flujo simulados en el acuífero somero y el acuífero profundo, respectivamente. Las dos figuras se graficaron a la misma escala en función de la magnitud de los flujos y con la misma densidad de vectores.

Aunque no se incluyó una figura, el flujo horizontal en los basaltos fue prácticamente nulo, resultado muy razonable teniendo en cuenta la naturaleza de esta formación. Los vectores de flujo en la capa 2 (Figura 6.19) indican que los arroyos que la atraviesan actuarían como descarga del flujo subterráneo, verificando lo postulado en el modelo conceptual. El mismo patrón se repite en el acuífero profundo (Figura 6.20), con un incremento en la magnitud de los flujos subterráneos hacia los arroyos que lo atraviesan en su área de afloramiento. Las zonas entre arroyos constituirían divisorias de agua, acompañando la topografía. Asimismo se destaca un flujo saliente de la capa 4 hacia el sector brasilero por el río simulado como borde norte del modelo, de distribución aproximadamente uniforme. También se observa un flujo saliente del modelo (de menor magnitud que el anterior) sobre el A° Cuñapirú en el tramo con sentido norte-sur. Esto es consecuencia de las condiciones de borde utilizadas, definidas de acuerdo a las direcciones de flujo identificadas en el análisis de la piezometría, a pesar de que este borde encierra gran incertidumbre por falta de piezometría en territorio brasilero. En la parte sur del área modelada se observa una concentración de flujos hacia los arroyos, en particular en el A° Tacuarembó. En la capa profunda es notoria la captación de flujo que ejerce el campo de bombeo en la zona de Rivera-Santana y el arroyo simulado inmediatamente al norte del cono de bombeo.

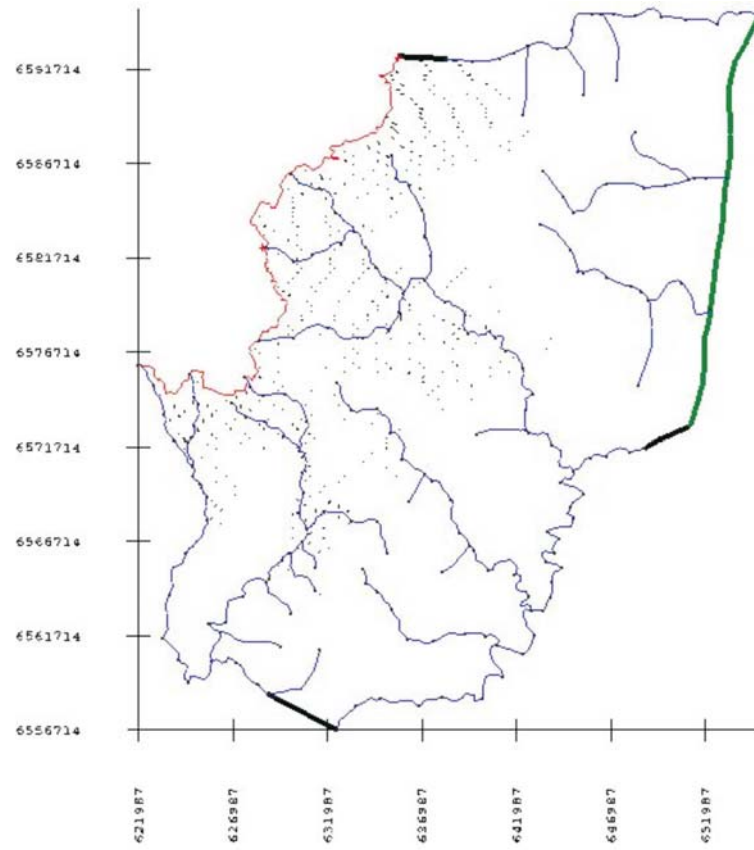


Figura 6.19: Vectores de flujo simulados en el acuífero somero (capa 2)

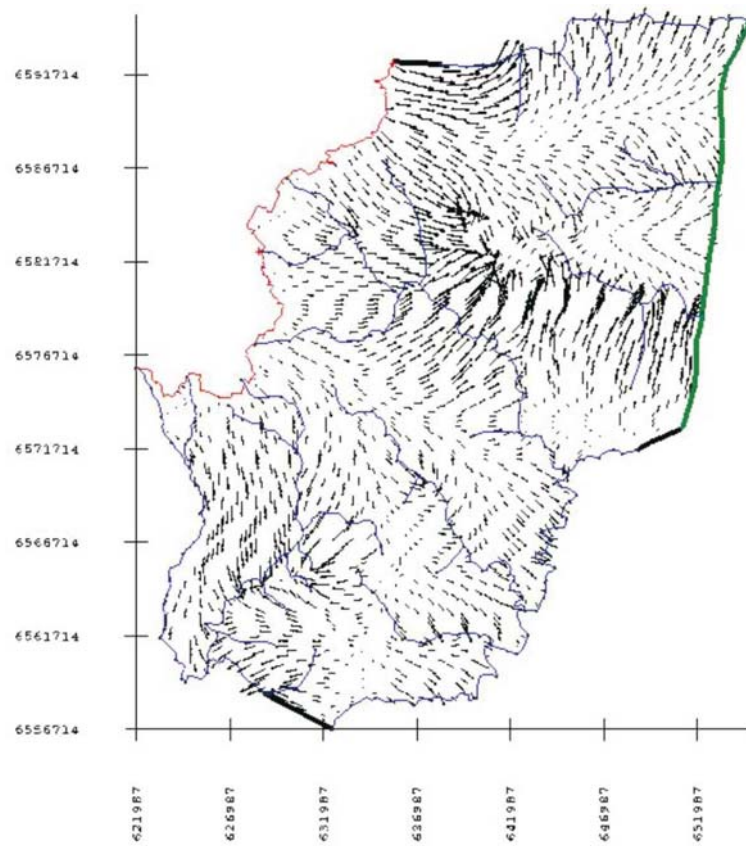


Figura 6.20: Vectores de flujo simulados en el acuífero profundo (capa 4).



Se considera que el modelo representa adecuadamente las direcciones principales del flujo subterráneo. La magnitud y dirección de los flujos deberían verificarse mediante mediciones de campo adicionales no disponibles al presente.

#### **6.5.4. Flujos y balance de masa.**

El análisis de los flujos a través de fuentes y sumideros, de los bordes del modelo y entre las capas permite identificar más claramente las direcciones de los flujos y los términos dominantes del balance de masa global del modelo. Ante la escasez de información de campo respecto de la magnitud real de los flujos, la evaluación es mayormente cualitativa, es decir, referida a la dirección de los flujos y no a su magnitud.

La Figura 6.21 ilustra la distribución de los flujos netos por tramos resultantes de la interacción agua subterránea / agua superficial a lo largo de todo el sistema de arroyos modelado. Según la convención de signos de MODFLOW, los flujos negativos indican flujo desde el acuífero hacia los ríos, los flujos positivos indican flujo desde los ríos hacia el acuífero.

Los flujos simulados indicarían que prácticamente todo el sistema superficial drena el sistema subterráneo, independientemente de la capa del modelo atravesada. La magnitud de los flujos es pequeña en las nacientes de los arroyos, cuando estos escurren a través de la Formación Serra Geral, lo que sería correcto teniendo en cuenta la naturaleza del lecho de los cursos de agua esperable en dicha zona. Aguas abajo, y en concordancia con la posible transición a sedimentos más permeables en el fondo de los arroyos, los flujos de intercambio se incrementan notablemente. A pesar de utilizar conductancias reducidas en la interfase río/acuífero, la magnitud de los flujos en el sector sur del modelo (en particular, A° Tacuarembó, A° De la Divisa y 900 S) resultó demasiado elevada. Esto es debido a la sobrestimación de la carga piezométrica, lo que genera gradientes agua subterránea/agua superficial exagerados, y con ello flujos negativos significativos. Futuras mejoras en la

calibración del modelo permitirían una verificación de la magnitud de los mismos.

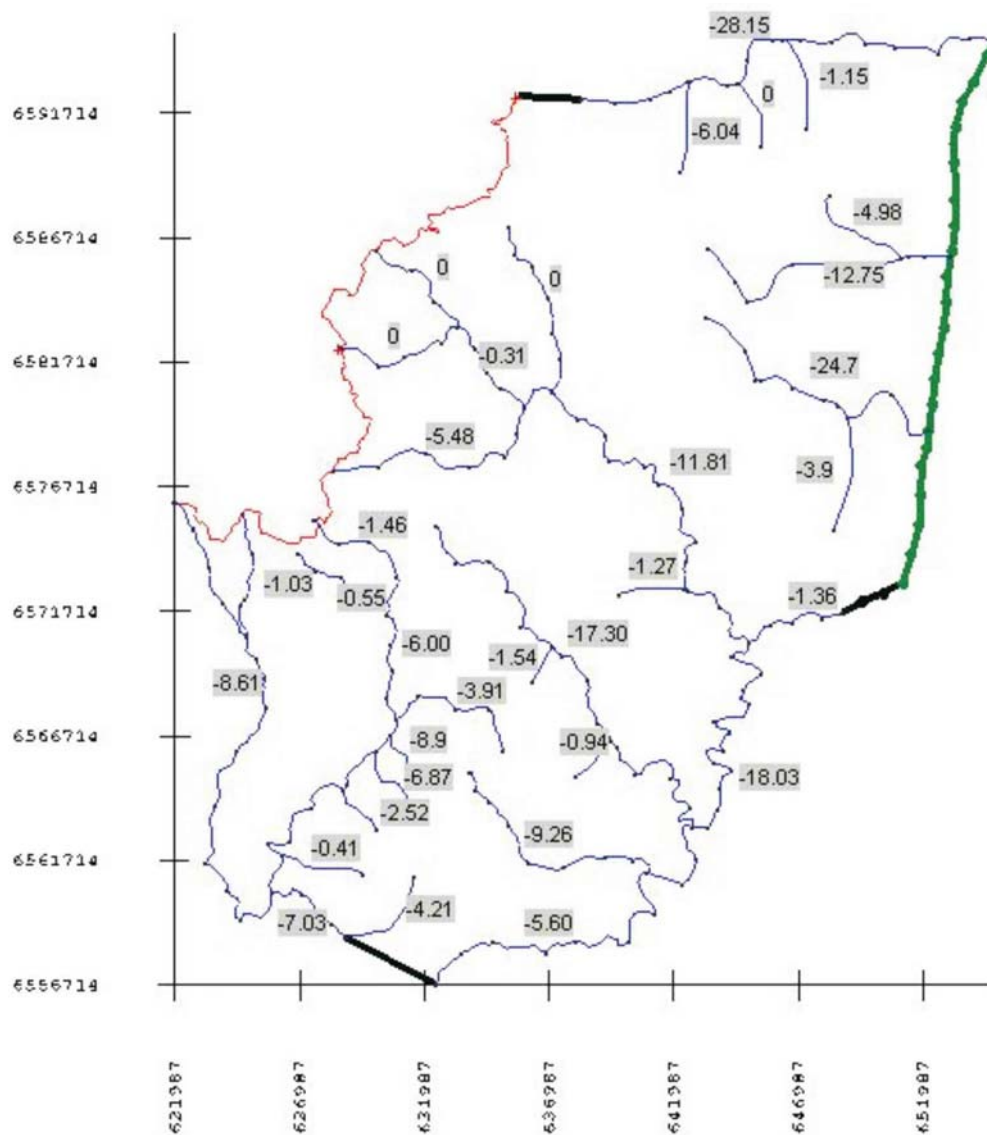


Figura 6.21: Flujos de intercambio río / acuífero expresados en  $m^3/d \times 10^3$ . Los flujos negativos indican flujo desde el acuífero hacia los ríos, los flujos positivos indican flujo desde los ríos hacia el acuífero.

La Tabla 6.5 presenta los flujos entrantes y salientes de cada capa provenientes de distintas fuentes. La misma información se volcó en el esquema de la Figura 6.22 para clarificar el análisis. En la gráfica los flujos entre capas se representaron con un solo término como flujo neto (FN) con su dirección correspondiente.

Tabla 6.5: Flujos entrantes y salientes expresados en  $m^3/d \times 10^3$

Flujos ENTRANTES							
Capa	A	R	CHP	FP	Fondo	Techo	TOTAL
1	0	8,424	0	-----	3,003	-----	11,427
2	0	54,570	14,508	-----	13,127	11,183	93,388
3	0	49,390	27,408	-----	25,052	57,100	158,950
4	0	159,228	7,374	-----	-----	138,325	304,927
TOTAL	0	269,827	49,290	-----	-----	-----	-----
Flujos SALIENTES							
Capa	A	Q	CHP	FP	Fondo	Techo	TOTAL
1	0,245	0	0	-----	11,183	-----	11,428
2	32,223	1,058	0,003	-----	57,100	3,003	93,387
3	4,816	2,683	0	-----	138,325	13,127	158,951
4	185,292	70,608	11,626	12,348	-----	25,052	304,926
TOTAL	222,576	74,349	11,629	12,348	-----	-----	-----

A: arroyos; Q: bombeo; R: recarga; CHP: flujo a través de borde de carga hidráulica prefijada; FP: flujo a través de borde de flujo prefijado; Fondo: flujo a través del fondo del acuífero hacia la capa subyacente; Techo: flujo a través del techo del acuífero hacia la capa suprayacente.

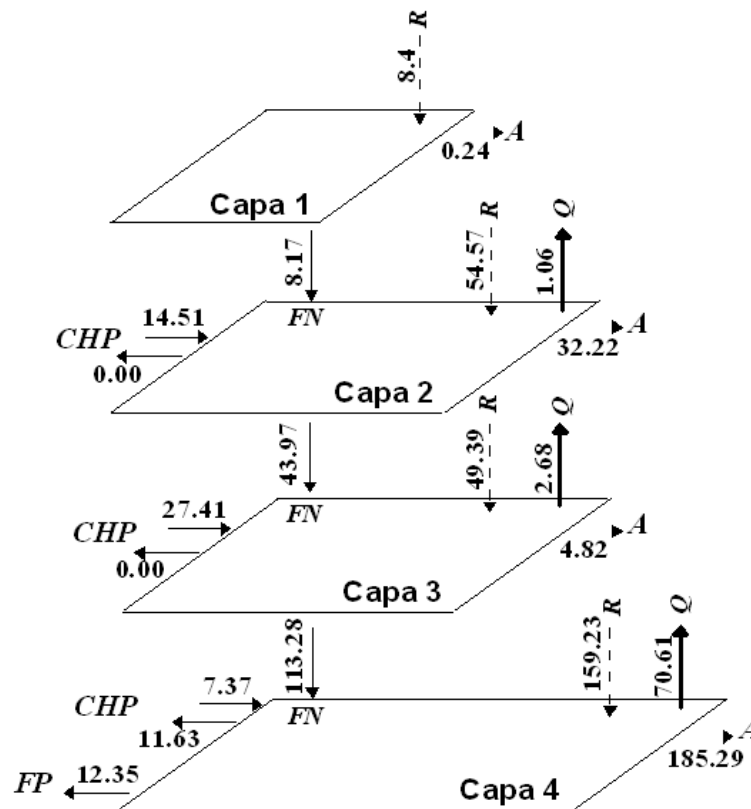


Figura 6.22: Esquema de flujos a través de las capas del modelo, expresados en  $10^3 m^3/d$ .

FN: Flujo Neto, A: Arroyos, CHP: Carga Hidráulica Prescripta, FP: Flujo Prescripto, R: recarga, Q: bombeo.

Según la calibración encontrada, los resultados indicarían que la fuente de agua dominante está constituida por la recarga proveniente de la precipitación, siendo de pequeña magnitud en el caso de los basaltos (tasa de recarga = 1,33 % de la precipitación anual) y apreciable en la zona aflorante de areniscas (tasa de recarga = 9,57 % de la precipitación anual). Las cuatro capas reciben  $271,614 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$  de recarga. Esta variable ha sido representada por flechas a trazos en la Figura 6.22.

El bombeo es una de las salidas más importantes del acuífero profundo siendo de una magnitud reducida en el acuífero somero.

Los flujos a través de la interfase río/acuífero fueron analizados con anterioridad. El modelo simula un flujo neto de intercambio desde el sistema subterráneo al superficial. Los flujos salientes/entrantes a través de los arroyos se representaron con flechas de línea punteada en la Figura 6.22. El flujo total saliente a través de los ríos es  $222,6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$  ( $2,57 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Una de las mayores incertidumbres del modelo está asociada a las condiciones de borde. Si bien el modelo simularía correctamente la dirección de los flujos de borde, su magnitud es incierta. Según los valores calibrados, ingresarían al área modelada  $49,29 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$  a través del borde del paquete completo de las areniscas situadas debajo de la capa basáltica. Por otro sector del mismo borde saldrían  $11,63 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ , por lo tanto habría una entrada neta de agua al área modelada. Su magnitud es pequeña comparada con otros términos del balance de masa. A través del borde de flujo prescripto habría un flujo saliente de mediana magnitud ( $12,348 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ ) comparado con otros términos del balance.

Uno de los objetivos de este proyecto era la estimación de la posible recarga de las areniscas a través de los basaltos fisurados. En tal sentido, el modelo indicaría la presencia de un flujo neto vertical descendente desde los basaltos hacia el acuífero somero de magnitud  $8,18 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ , confirmando la hipótesis principal del proyecto. De igual

manera, el modelo estaría mostrando la presencia de un flujo vertical descendente desde el acuífero somero (integrando capas 2 y 3) hacia el acuífero profundo aproximadamente 20 veces mayor ( $113,28 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ ) que el flujo entre basalto y somero. Las direcciones de estos flujos están en concordancia con lo postulado en el modelo conceptual en base a la piezometría observada.

Tanto las direcciones como las magnitudes de todos los términos de flujos deberían verificarse con información de campo adicional y mejoras futuras del modelo.

## **6.6. Análisis de sensibilidad.**

Uno de los parámetros que debieron ajustarse para llegar a una calibración aceptable del modelo fue la tasa de recarga sobre los basaltos y sobre las areniscas aflorantes. Es sabido que en la modelación matemática la recarga es uno de los parámetros que mayor incertidumbre encierra dada la imposibilidad de una medida directa de la misma. Por tal razón se realizó sólo el análisis de sensibilidad de dicho parámetro.

El análisis de sensibilidad es el proceso de variar parámetros de entrada al modelo dentro de un rango razonable (rango de incertidumbre de los valores del parámetro) y observar los cambios relativos en la respuesta del modelo. El propósito de este análisis no es sólo demostrar la sensibilidad de las simulaciones a la incertidumbre de ciertos parámetros sino también mostrar la utilidad para proponer actividades futuras de recolección de datos que puedan mejorar la calibración del modelo y justificar algunas hipótesis de comportamiento.

Por un lado se exploró la sensibilidad de los resultados del modelo a la variación de la tasa de recarga sobre los basaltos, en particular del flujo vertical entre esta capa (C1) y las areniscas subyacentes (C2) y del error medio cuadrático en las capas 2 y 4. En la Figura 6.23 se presenta el resultado de este análisis.

La tasa de recarga sobre los basaltos se disminuyó hasta un 50 % y se aumentó hasta 10 % de su valor calibrado (eje de abscisas). No se pudieron probar valores superiores de

recarga debido a problemas de convergencia, de todas maneras dichos valores no estarían dentro de un rango físico para rocas de estas características (permeabilidad secundaria por fracturas). La respuesta del modelo se midió en porcentaje de cambio respecto al valor calibrado de la variable respectiva, sea ésta flujo vertical entre C1 y C2 o error medio cuadrático (RMSE). En la figura se observa que el flujo entre basaltos y areniscas disminuye hasta un 43% cuando la tasa de recarga sobre los basaltos disminuye un 50%, mientras que lo hace en un 5% cuando la tasa de recarga disminuye en esa misma proporción. El error medio cuadrático de la carga piezométrica en las capas 2 y 4 no se vio prácticamente afectado para ninguno de los casos ensayados.

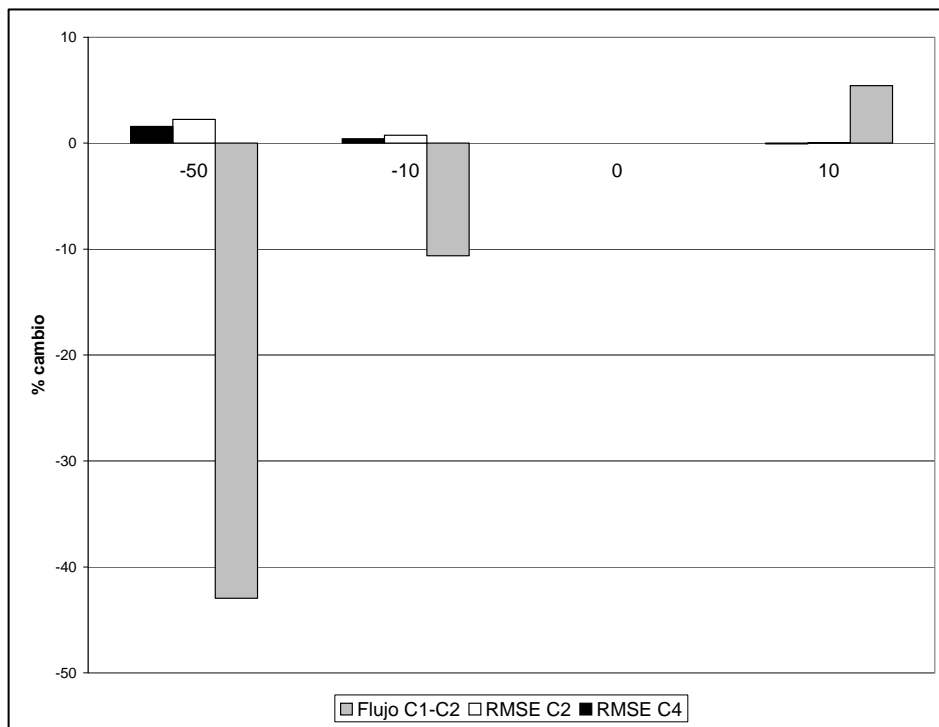


Figura 6.23: Análisis de sensibilidad respecto a la recarga sobre los basaltos.

Un análisis similar se efectuó respecto a la recarga sobre las areniscas aflorantes. En este caso se calculó el cambio experimentado por el flujo entrante/saliente de los ríos en la capa 4, los flujos netos verticales entre capas y los errores medios cuadráticos de todas las capas.

En la Figura 6.24 se observa que el flujo acuífero/río en la capa 4 aumenta un 7% cuando la recarga sobre las areniscas aumenta 10% y, disminuye 15% y 58% cuando la

recarga disminuye 10 % y 50 %, respectivamente. En este último caso vale remarcar que también se observa una inversión del sentido de flujo a través de la interfase acuífero/río que compensaría en parte la escasa recarga por precipitaciones que se está simulando.

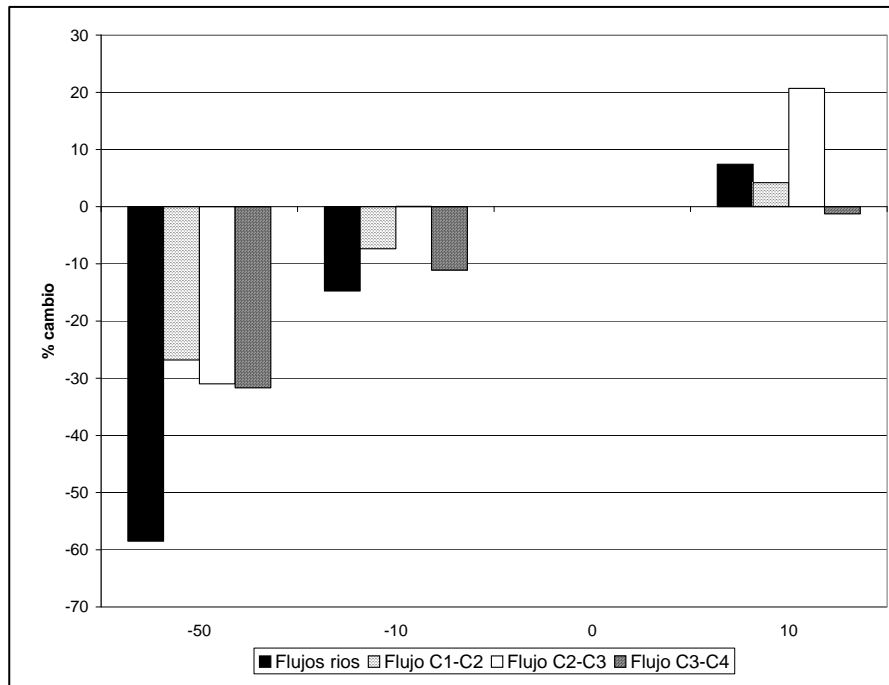


Figura 6.24: Flujos verticales y a través de los ríos en función de la recarga sobre las areniscas aflorantes.

Respecto a los flujos verticales netos entre capas el comportamiento es similar en las tres interfases, siendo siempre flujo descendente, aumentando o disminuyendo su valor cuando la recarga aumenta o disminuye, respectivamente. Sin embargo, uno de los cambios más significativos se observa en la interfase entre la capa 2 y 3 cuando la recarga aumenta un 10%, en este caso la variación del flujo fue de un poco más del 20%. Esto ocurre debido a que el número de celdas que se secan en la capa 2 es menor cuando la recarga aumenta, por lo tanto también es mayor la superficie de contacto entre capas y por ende mayor el flujo entre las mismas.

La Figura 6.25 muestra como se comportó el error medio cuadrático en las tres capas respecto a la tasa de recarga sobre las areniscas. En la capa 3 el error se mantuvo prácticamente invariable. Sin embargo, en las capas 2 y 4 los errores aumentaron

significativamente cuando la tasa de recarga se disminuyó un 50 % de su valor calibrado, debido probablemente a que son capas definidas como libres y por lo tanto más susceptibles a las variaciones en la tasa de recarga, al contrario de lo que ocurre en la capa 3 que está definida como confinada.

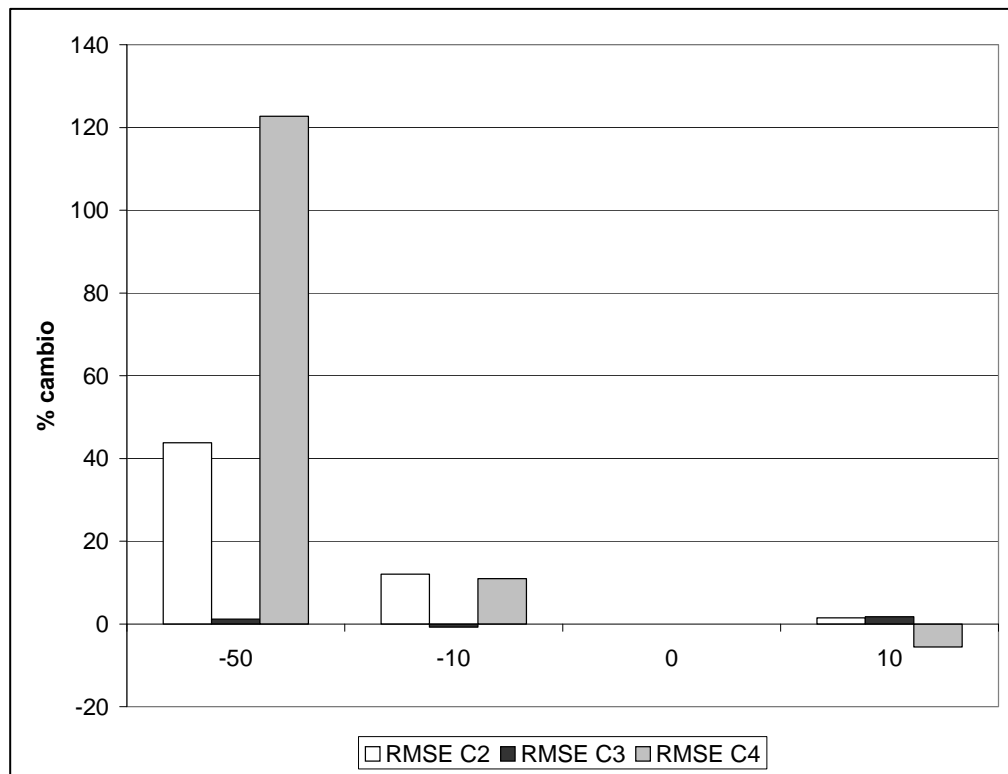


Figura 6.25: Error medio cuadrático (RMSE) en las capas 2 a 4 respecto a las variaciones en la tasa de recarga sobre las areniscas aflorantes.



## 6.7. Explotación del modelo.

Por último se intentó simular en estado estacionario el comportamiento del modelo en función de un esquema futuro de crecimiento del bombeo (Alejandro Oleaga, 2007, comunicación personal). La simulación se realizó agregando nuevos pozos de explotación en dos zonas, una el Parque Gran Bretaña, actual parque de perforaciones de OSE en la ciudad de Rivera, y otro en una zona de explotación proyectada a futuro, ubicada un poco más al sur del casco urbano de la ciudad hacia el oeste de la Ruta Nacional N° 5

En primer lugar se simuló un aumento de casi el 40 % del bombeo actual en la zona del Parque Gran Bretaña, mediante la instalación de 10 pozos nuevos que extraen  $240 \text{ m}^3/\text{d}$  cada uno. En la Figura 6.26 se pueden comparar las líneas piezométricas de la situación actual (a) con la situación hipotética (b) de aumento en la explotación, en la capa 4. Con ese bombeo se puede detectar un incipiente cono provocado por las nuevas perforaciones, pero que sería de carácter local no afectando así al resto del área modelada. Hecho que también demuestra el RMSE que se mantuvo en 6,4 m.

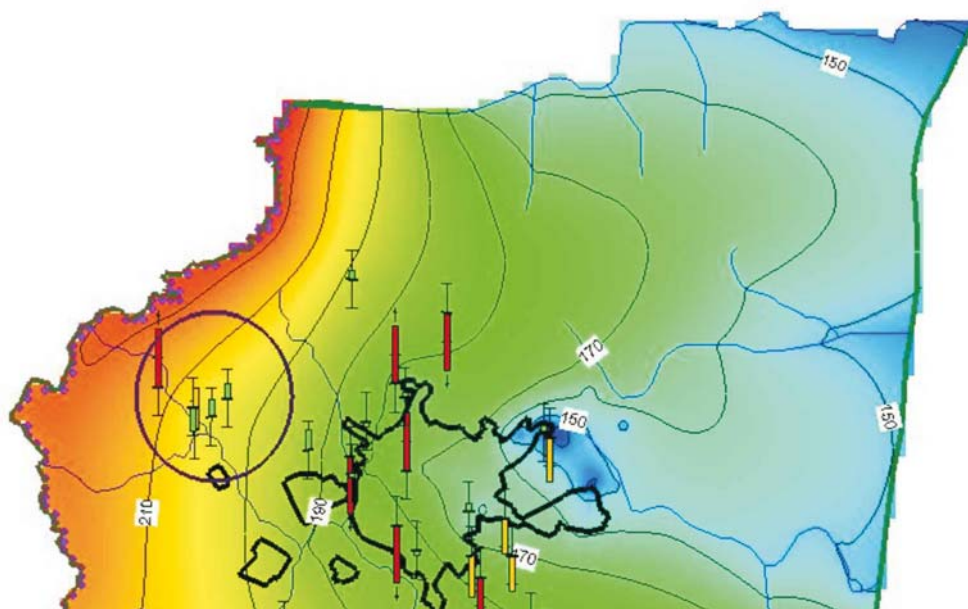


Figura 6.26a: Líneas piezométricas en la zona del Parque Gran Bretaña. Rivera. Situación actual.

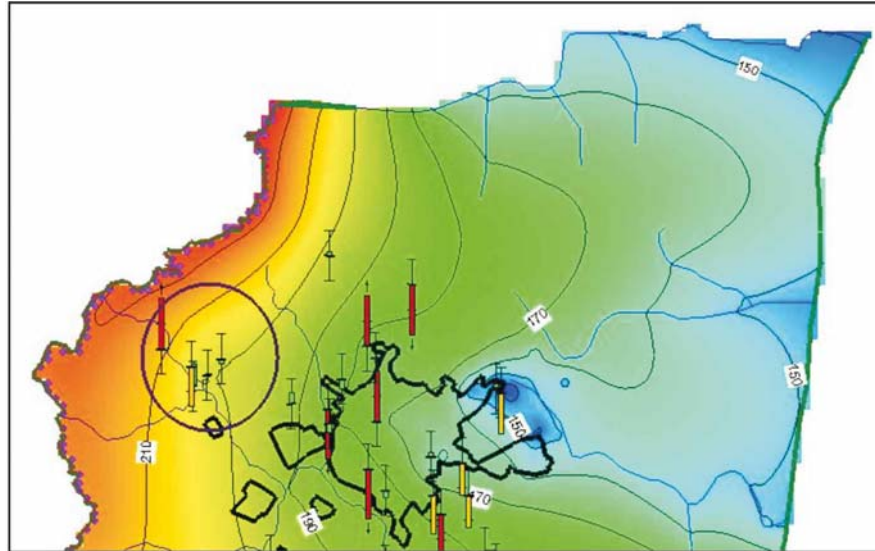


Figura 6.26b: Líneas piezométricas en la zona del Parque Gran Bretaña, Rivera. Situación proyectada.

En la otra zona, parque de perforaciones proyectado, se simuló un incremento en el bombeo adicionando 10 pozos que extraen 210 m<sup>3</sup>/d cada uno, lo que quintuplicaría la extracción actual en dicho sector. La Figura 6.27 muestra las líneas piezométricas de igual forma que para el caso anterior, permitiendo concluir que el efecto de esta explotación tendría una incidencia local, pero que mayores caudales podrían afectar perforaciones ubicadas en la planta urbana de la localidad de Rivera.

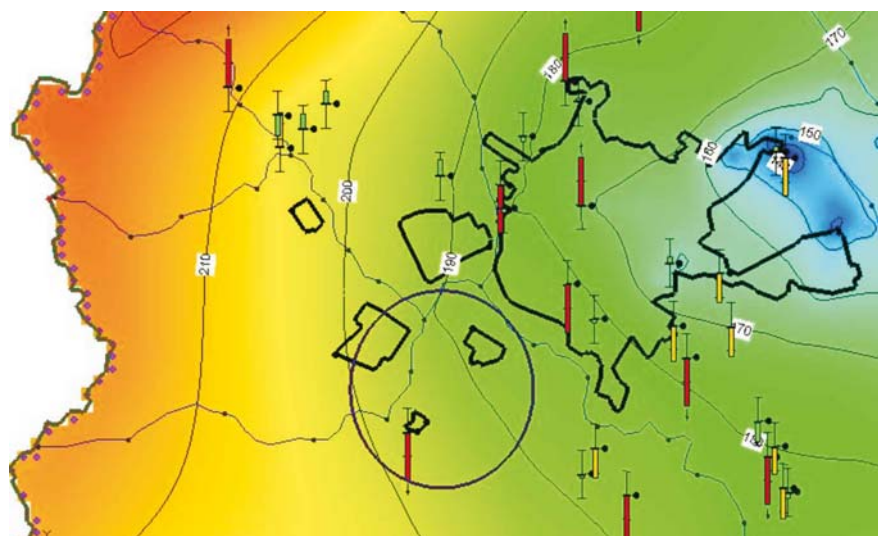


Figura 6.27a: Líneas piezométricas en una zona proyectada como futuro parque de perforaciones. Situación actual.

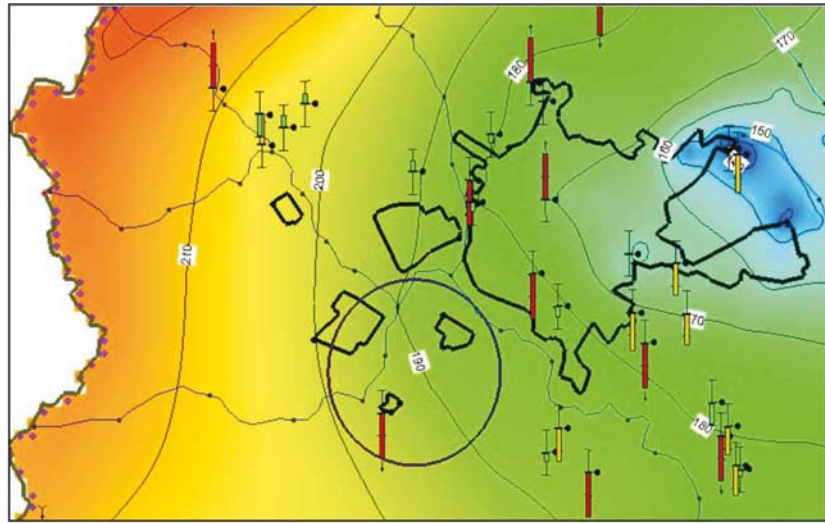


Figura 6.27b: Líneas piezométricas en una zona proyectada como futuro parque de perforaciones. Situación proyectada.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Esta tesis se realizó en el marco del proyecto de investigación denominado “Desarrollo metodológico para la evaluación de la recarga y vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en Argentina y Uruguay”, financiado por el Fondo de Universidades. Este fondo es un complemento del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG). En este proyecto de carácter multidisciplinario participaron la Universidad Nacional del Litoral (responsable), el Instituto Nacional del Agua (INA), el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), de Argentina, y la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) de Uruguay.

El objetivo principal de la tesis fue revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico/hidráulico del Sistema Acuífero Guaraní en el área de Rivera/Santana do Livramento y validarlo mediante la simulación numérica, con énfasis en la estimación de la recarga, tanto directa proveniente de la precipitación como indirecta proveniente de la formación fisurada suprayacente a las areniscas que componen el acuífero Guaraní.

Se presenta un breve resumen de las principales conclusiones del Proyecto del Fondo referidas a piezometría e hidrogeoquímica y modelo conceptual, los que constituyeron insumos básicos en el desarrollo de esta tesis. Finalmente, se resumen los resultados más relevantes de la implementación del balance hídrico y del modelo numérico.

#### **Piezometría e hidrogeoquímica**

□ A partir de información relevada en campo y de información antecedente se identificaron tres niveles hidráulicos lo que permite suponer intercambios de flujo entre ellos. Se observó un nivel de agua en basaltos por encima del nivel hidráulico del sector somero del acuífero Guaraní, con diferencias de nivel importantes. En los sectores más

permeables del SAG, se observó que el sector somero (superior) posee niveles por encima del sector profundo (inferior), apoyando la hipótesis de recarga y flujo descendente.

- La piezometría del sector profundo del SAG reconstruida a partir de niveles medidos en 2004 y 2005 mostró una zona de mayores descensos en cercanías de Santana do Livramento hacia la cual conducían las líneas de flujo. En el sector uruguayo se encontró una zona de menor cota potenciométrica coincidente con el parque de perforaciones de OSE.
- La dirección de flujo en el lado uruguayo es mayormente NE, con un gradiente de  $3.5 \times 10^{-4}$  en dirección de la frontera. En la frontera noroeste se observó un flujo Oeste–Este con un gradiente levemente mayor ( $5 \times 10^{-4}$ ) mientras que al norte se observó un flujo SSE en dirección de Santana con un gradiente de aproximadamente  $1 \times 10^{-2}$ , posiblemente influido por el intenso bombeo.
- La información piezométrica obtenida en pozos en basaltos no es suficiente para estimar direcciones de flujo horizontal, sólo se pudo inferir una componente vertical de movimiento, apoyado por el análisis hidroquímico.
- Analizando la hidrogeoquímica en conjunto con la piezometría, se puede inferir que el agua recarga en basaltos y circula en dirección al área urbana, recibiendo en las areniscas recarga de muy baja salinidad. A medida que el agua comienza a descender al acuífero profundo, ésta comienza a incrementar su contenido iónico.

### **Modelo conceptual de funcionamiento del sistema**

- El modelo conceptual de funcionamiento del SAG en la zona de estudio que se propone, fundamentado en los estudios de detalle de la geología, la piezometría y la hidroquímica, es el siguiente:

4. Acuífero superior, constituido por sectores superiores alterados de los derrames basálticos, con agua de alto pH y conductividad eléctrica.
5. Acuífero inferior, Guaraní, contenido en areniscas de edad Triásico-Jurásico, incluido en las formaciones Rivera, Tacuarembó y Buena Vista. Muestra un comportamiento de tipo multicapa, dentro del cual se detecta:
  - a) Sector acuífero granular superior “somero”, constituido por areniscas, de un espesor de decenas de metros, de transmisividad hidráulica media, con agua de pH y conductividad eléctrica bajos, de características similares al agua de lluvia.
  - b) Acuitardo, constituido por areniscas de alto contenido arcilloso, que constituye un medio poco permeable que regula el flujo entre acuíferos granulares.
  - c) Sector Acuífero granular inferior “profundo”, constituido por areniscas, de un espesor de más de cien metros, el cual presenta a su vez varios sectores permeables. Es el que posee mayor transmisividad hidráulica, y se caracteriza por valores de pH próximos a la neutralidad y conductividad eléctrica de menos de 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
6. Acuitardo inferior, constituido por rocas sedimentarias poco permeables, de edad Devónico-Pérmicas.

### **Balance hídrico**

✓ Se empleó la planilla de cálculo Easy-Bal con el fin de estimar la recarga mensual y anual. Easy Bal estima la evapotranspiración potencial ETP mediante la fórmula de Thornwaite a partir de datos mensuales de temperaturas, en función de la latitud. Una vez calculada la ETP, la Evapotranspiración Real (ETR) se calcula teniendo en cuenta las características del suelo de la región en términos de disponibilidad de agua y la precipitación para el período considerado.

✓ Se utilizaron datos meteorológicos (precipitaciones y temperaturas) de dos fuentes:

1) Estación Rivera, Dirección Nacional de Meteorología del Uruguay, datos mensuales de la serie 1914 -1997. Estos datos se denominaron “puntuales”; 2) Base de datos de CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, Inglaterra), datos mensuales de la serie 1901-2002, disponibles en una grilla de espaciamiento de 5°. Estos datos se denominaron “de grilla”. Comparando ambas series, para los períodos superpuestos, se pudo verificar que presentan similares tendencias para las dos variables utilizadas, precipitación y temperatura. Sin embargo, respecto a la precipitación los datos de grilla evidencian un efecto de suavizado de los picos respecto de los valores puntuales, atribuyéndose al método de interpolación utilizado para la generación de dichos datos.

✓ Se estimó una recarga promedio en la zona del SAG aflorante de 139,5 mm/año (8,6 % de la precipitación media anual) con la serie de datos puntuales de la estación de Rivera; y un valor de 141,1 mm/año (8,82 % de la precipitación media anual) con los datos de grilla, en el período de años superpuestos (1960 - 1997).

✓ Se aplicó el balance en los basaltos con el fin de obtener una estimación de la recarga en este sector. La presencia de estas rocas con permeabilidad secundaria se simuló con un valor de laminación mucho menor. Dicho valor resultó en 75 mm, y la recarga media anual obtenida para el período 1960 – 1997 fue de 47,2 mm/año (2,9 % de la precipitación media anual) para la serie de datos puntuales, mientras que se obtuvo una tasa de recarga de 43,6 mm/año (2,72 % de la precipitación media anual) para la serie de datos de grilla.

### **Modelo numérico**

En la presente tesis se mejoró y robusteció el modelo numérico implementado en el proyecto del Fondo. Las principales conclusiones de la nueva versión del modelo son:

- La modelación numérica permitió validar adecuadamente el modelo hidrogeológico conceptual propuesto; reproducir el funcionamiento actual del sistema y estimar un valor aproximado de recarga de las areniscas, ya sea proveniente de los basaltos suprayacentes o de la precipitación.
- El modelo reproduce la situación observada en 2004-2005 bajo la suposición de estado estacionario. El área total modelada fue de aproximadamente 750 km<sup>2</sup> (650 km<sup>2</sup> en el Proyecto del Fondo) extendiéndose en el sector brasilero hasta alcanzar bordes más físicos.
- Se mejoró la definición de las condiciones de borde en el sector brasilero. No obstante la mejora de los resultados alcanzados, persisten incertidumbres, en especial en cuanto a la magnitud de los flujos. Esa incertidumbre sólo podrá acotarse si se dispusiera de información de campo adicional.
- El modelo numérico consta de cuatro capas coincidentes con las formaciones definidas en el modelo conceptual y luego reproducidas en la estratigrafía 3D del sistema. Se empleó el modelo digital del terreno de detalle (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM).
- La calibración arrojó resultados satisfactorios. La dirección de los flujos simulados está de acuerdo en términos generales con las relevadas en campo y postuladas en el modelo conceptual. La distribución y magnitud de las conductividades hidráulicas calibradas son coherentes con los valores estimados a partir de ensayos de bombeo.
- El error medio entre la carga piezométrica observada y simulada indica en general que los niveles simulados están subestimados respecto a los observados. La capa 4 fue la de mejor ajuste con un error medio cuadrático de 6,41 m (la primera versión del modelo era superior a los 10 m).



- El modelo indicaría la existencia de un flujo descendente, esto es recarga desde el basalto fracturado hacia el acuífero somero, y desde éste hacia el acuífero profundo, resultado que verificaría la hipótesis de trabajo del proyecto.
- La recarga se introdujo en dos áreas diferenciadas, una sobre los basaltos y otra sobre todas las areniscas aflorantes sin definir una tasa de recarga diferente entre acuífero somero y profundo. La tasa resultante de la calibración sobre los basaltos fue de 21,9 mm/año y sobre areniscas de 156.95 mm/año, equivalente a 1,35 % y 9,60 % respectivamente, de la precipitación media anual en la estación Rivera.
- El análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a la variación de la tasa de recarga sobre los basaltos y sobre las areniscas mostró que:
  - a) el flujo entre basaltos y areniscas disminuye en un mismo orden que la tasa de recarga sobre los basaltos. El error medio cuadrático de la carga piezométrica en las capas 2 y 4 no se vio prácticamente afectado para ninguno de los casos ensayados.
  - b) la descarga del sistema subterráneo al superficial en la capa 4 aumenta un 7 % cuando la recarga sobre las areniscas aumenta 10% y disminuye 15 % y 60 % cuando la recarga disminuye 10 % y 50 %, respectivamente. En este último caso se observa una inversión del sentido de flujo a través de la interfase acuífero/río que compensaría en parte la escasa recarga por precipitaciones que se está simulando.
  - c) los flujos verticales netos entre capas siempre son descendentes, aumentando o disminuyendo su valor cuando la recarga aumenta o disminuye, respectivamente. Uno de los cambios más significativos se observa en la interfase entre la capa 2 y 3 cuando la recarga aumenta un 10%, en este caso la variación del flujo es de un poco más del 20%. Esto ocurre debido a que el número de celdas que se secan en la capa 2 es menor cuando la recarga aumenta, por lo tanto también es mayor la superficie de contacto entre capas y por ende mayor el flujo entre las mismas.

### **Explotación del Modelo**

Se analizaron dos escenarios de explotación futuros para predecir la respuesta del sistema subterráneo ante un posible incremento del bombeo:

- a) incorporación de 10 nuevos pozos de explotación que extraen 240 m<sup>3</sup>/d cada uno en el Parque Gran Bretaña, actual parque de perforaciones de OSE en la ciudad de Rivera;
- b) incorporación de 10 nuevos pozos que extraen 210 m<sup>3</sup>/d cada uno en una zona de explotación proyectada a futuro, ubicada un poco más al sur del casco urbano de la ciudad de Rivera hacia el oeste de la Ruta Nacional N° 5.

El efecto de ambas explotaciones tendría una incidencia local (formación de un cono mayor), pero para el segundo escenario caudales mayores podrían afectar perforaciones ubicadas en la planta urbana de la localidad de Rivera.

### **Recomendaciones Futuras**

No obstante la presente tesis amplía el conocimiento actual del comportamiento hidrogeológico del SAG en el área de estudio, es necesario remarcar ciertas recomendaciones para la utilización futura de sus resultados, específicamente del modelo numérico como una herramienta de gestión del recurso hídrico subterráneo en la zona, a saber:

- Completar la información hidrogeológica con datos de campo adicionales. Sistematizar el censo de perforaciones y definir planes de monitoreo continuos, principalmente mediciones de niveles estáticos y de caudales de explotación. Sería conveniente contar, al menos, con un censo de pozos anual, más aún teniendo en cuenta las proyecciones de expansiones futuras de la explotación subterránea.
- Realizar ensayos de bombeo para determinar los parámetros hidráulicos, con énfasis en aquellos pozos alejados del casco urbano, donde no se cuenta con este tipo de información, y por ende, donde la calibración del modelo posee mayor incertidumbre.

- Mejorar el conocimiento geológico, y por ende la geometría de las diferentes formaciones mediante datos de profundidades y contacto entre capas a través de perfiles litológicos, principalmente para verificar la extensión areal y el espesor del acuitardo. Revisar el criterio de diferenciación entre acuífero somero y acuífero profundo que fue colocado en la cota de 170 m.
- Aforar ríos y arroyos, fundamentalmente si es posible en períodos de estiaje donde se miden directamente los caudales base.
- Verificar las tasas y fuentes de recarga con otras metodologías de estudios, como ser los análisis isotópicos.
- Representar la evapotranspiración explícitamente en el modelo.
- Implementar el modelo en estado transitorio a los fines de una mejor calibración de los parámetros. Esto no invalida los resultados alcanzados, sino que potenciaría el uso futuro del modelo.
- Repetir las simulaciones de escenarios futuros en régimen transitorio teniendo en cuenta la variación temporal de la recarga y los esquemas de incremento del bombeo en el tiempo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aller L, Bennett T, Lehr JH, Petty RJ, Hackett G (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035.

ANCAP (Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland) (1987) Investigación petrolera en la cuenca norte de Uruguay (segunda etapa).

Anderman E y Hill MC (2000) Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - Documentation of the Hydrogeologic-Unit Flow (HUF) package. Denver, Colorado.

Andreis RR, Ferrando LA (1988) Facies y Paleocorrientes de la formación Cerrezuelo en su estrato tipo; nuevos datos para la evolución de la Cuenca Devónica del Uruguay. I Reunión Argentina de Sedimentología: 6-10. Buenos Aires. Argentina.

Arnold JG, Allen PM (1999) Automated Methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. Journal of the American Water Resources Association. Vol. 35:2.

Aráujo LM, Franca AB, Potter PE (1995) Acuífero Gigante del Mercosur (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay: Mapas Hidrogeológicos de las Formaciones Botucatu, Piramboia, Rosario do Sul, Buena Vista, Misiones y Tacuarembó. PETROBRAS-UFPR., Brasil.

Bear J (1972) Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York.

Bessouat C (2005) "Caracterización de áreas de recarga y descarga del SAG en Rivera - Livramento y Quaraí – Artigas". Fondo de Universidades, Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.

BGS (British Geological Survey) (2005) BaSeLiNe – natural baseline quality in European aquifers: a basis for aquifer management. <http://www.bgs.ac.uk/hydrogeology/baseline/europe/model.html>

Bossi J (1966) Geología del Uruguay. Universidad de la República, Departamento de Publicaciones, Colección Ciencias 2: 1-470, Montevideo.

Bossi J, Ferrando L, Fernández A, Elizalde G, Morales H, Ledesma J, Carballo E, Medina E, Ford I, Montaña J (1975) Carta Geológica del Uruguay 1/1.000.000. Dirección de Suelos y Fertilizantes, Montevideo.

Bossi J, Navarro R (1982) Los "granitos negros" (microgabros) del Eocambriano del Uruguay. 5º Congreso Latinoamericano de Geología. Actas 2: 23-35, Buenos Aires.

Bossi J, Schipilov A (1998) The Arapey Group: confining basalts of the Guarani Aquifer in Uruguay, *Revista Agrociencia*, Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay, Vol II – 1, pp 12-25.

Campos HCNS (1998) Applied groundwater modeling in the Botucatu aquifer system, Brazil. 8th Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment, Vancouver, Canadá. *Proceedings Balkema*, Rotterdam, 2359-2366.

Campos H (2000) Modelación conceptual y matemática del Acuífero Guaraní, Cono Sur. *Acta Geológica Leopoldesina*. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre, Brasil.

Caorsi J, Goñi J (1958) *Geología Uruguay*, Instituto Geológico del Uruguay. *Boletín* 37: 1-73. Montevideo.

CE (2005) European water framework directive (2000/60/CE). Implications in groundwater management. <http://www.portofentry.com/site/root/resources>.

Caetano Chang MR (1997) A Formação Pirambóia no Centro-Leste do Estado de São Paulo. Tese de Livre-Docência (Instituto de Geociências e Ciências Exatas), UNESP, Rio Claro-SP, 196 p., 41 figs., 64 fotogr., 7 tab.

Collazo P, Auge M, Montañó 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.

Collazo P (2006) Investigación hidrogeológica del Acuífero Guaraní en el área aflorante de los departamentos Rivera y Tacuarembó, Uruguay. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988) *Applied Hydrology*. Mc Graw Hill, USA.

Custodio E (1974) Contribuciones al Conocimiento Geohidroquímico de la Isla Lanzarote, (Islas Canarias, España). Simposio Internacional Sobre Hidrología de Terrenos Volcánicos. Gobierno Español, UNESCO-PNDU., Actas, pag: 305-345 Arrecife de Lanzarote, España.

Custodio E, Llamas MR (1983) *Hidrología Subterránea*. Editorial Omega, Segunda Edición, Tomos I y II. Barcelona, España.

De los Santos J (1999) Propuesta de Metodología de Control para el Ordenamiento del Uso del Acuífero Termal Guaraní en Uruguay. DNH-PNUD.

De los Santos J (2001) Estudio de factibilidad para la localización de un pozo termal en el departamento de Artigas, Uruguay. DNH-PNUD.

De Santa Ana H, Verovslasky G (1993) Cronoestratigrafía de las secuencias paleozoicas de la Cuenca Norte Uruguaya (borde sureste de la Cuenca de

Paraná). Resúmenes Ampliados 1º Simposio sobre Cronoestratigrafía da Bacia do Paraná, Rio Claro. Brasil.

De Santa Ana H y Ucha N (1994) Exploration perspectives and hydrocarbon potential of the Uruguayan sedimentary basins. Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP). 100 pp.

De Souza S (2001) Informe final de la perforación de Termal Kanarek, Daymán, Uruguay.

De Souza S (2002) Informe final de la perforación de Posada del Siglo XIX, Daymán, Uruguay.

Decoud P, Rocha L (2000) Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NW del Uruguay. 1º Encuentro Mundial de Hidrogeología. Fortaleza, Brasil.

Dellepère A (1992) Datación por Carbono 14 de las Aguas Termales del Acuífero Tacuarembó (Botucatu) Uruguay. 2º Congreso Geológico del Uruguay. Actas I: pag 307-313.

DNM (2006) Dirección Nacional de Meteorología de Uruguay. <http://www.meteorologia.com.uy>.

Falconer J (1931) Terrenos gondwánicos del Departamento de Tacuarembó: Memoria explicativa del Mapa Geológico. Instituto de Geología y Perforaciones del Uruguay Boletín 15: 1-17, Montevideo

Fernández A, Arensburg I (1994) Grados de Vulnerabilidad del Sistema Acuífero del Gran Buenos Aires. Criterios para su Determinación. Actas del II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, ALHSUD, Santiago de Chile, Chile. Pág:17-30.

Ferrando L, Andreis R (1986) Nueva estratigrafía en el Gondwana de Uruguay. 1er. Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos 1: 295-323, Buenos Aires.

Ferrando LA, Andreis R (1990) Una nueva localidad de la formación Melo Aº Seco (Depto. De Rivera, Uruguay) . Litofacies e interpretación paleoambiental preliminar. Annual Meeting of the Working Group Project Nº 211. IUGS - UNESCO. 69-71. Buenos Aires. Argentina.

Ferrando L, Montaña R (1987) Hipótesis Preliminar sobre la Evolución Paleogeográfica de Cuenca de Paraná en el Uruguay. III Simposio Sul Brasileño, de Geología, Actas vol 1:393-400, Curitiba, Brasil.

Flores Machado JL (2005) Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Acuífero Guaraní no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Sao Leopoldo, Brasil.

Flores Machado JL, Faccini UF (2006) Potencialidade das unidades hidroestratigráficas do sistema Aquífero Guaraní no Río Grande do Sul, Brasil. Congreso ALHSUD, Paraguay.

Foster S (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc. Intern. Conf. "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants". Noordwijk, The Netherlands, April 1987.

Foster S, Hirata R, Gomes D, D'Elia M, Paris M (2002) Groundwater Quality Protection a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies WHO-PAHO-CEPIS & UNESCO-ROSTLAC-PHI and GW.MATE The World Bank, Washington D.C.

Fraga CG (1986) Introdução ao zoneamento do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná, São Paulo), 127p. (Dissertação do mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo). Circulação restrita.

Fraga CG, Lisboa AA (1978) Relatório conclusivo do poço tubular profundo Borrazópolis – 1.ARH-Administração de Recursos Hídricos. Curitiba-PR, 19p.

Fraga CG, Lisboa AA (1980) Relatório conclusivo do subprojecto Botucatu. SUREHMA-Superintendencia dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Curitiba-PR, 69p.

Fraga CG, Lisboa AA (1992) Origem do fluoreto em águas subterrâneas dos sistema aquífero Botucatu e Serra Geral da bacia do Paraná. Sao Paulo, USP. Tese de doutorado, 178p.

Fresina M, Forzinetti M, Silva Busso A (1995) Evaluación Cualitativa de la Vulnerabilidad del Acuífero Libre en el Área Hidrogeológica del Río Salado, Prov. de Santa Fe. Revista de la AZAGAI-IAEG, Vol. IX Pág.: 214-224, Buenos Aires, Argentina.

Gatti D (2003) Elementos Hidroestratigráficos para la Protección de Acuíferos en el área del conurbano bonaerense y Ciudad de Buenos Aires. Trabajo final de Beca. Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina (Inédito).

Gilboa Y (1977) The groundwater resources of Uruguay. Hydrological Sciences, XXII, 1.

Gilboa Y, Mero F, Mariano B (1976) The Botucatu aquifer of South America, model of an untapped continental aquifer. Journal of Hydrology, 29, pp 165-179.

Groundwater Modeling System - GMS V. 6.0 (2006) Bringham Young University. EMS, Inc. Utah, USA.

Halford KJ, Mayer GC (2000) Problems associated with estimating ground water discharge and recharge from stream - discharge records. Groundwater, Vol. 38:3.

Hannula SR, Esposito KJ, Chermak JA, Runnells DD, Keith DC, Hall LE (2003) Estimating ground water discharge by Hydrograph Separation. Ground Water, Vol. 41:3.

Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG (2000) MODFLOW 2000, the U.S.G.S. Modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the ground water flow process. USGS Open file report 00-92.

Hausman (1995) Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul. Acta Geologica Leopoldensia. Série Mapas, 2.

Healy RW, Cook PG (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10:1.

Hem JD (1959) Study and interpretation of chemical characteristics of natural water, Geol. Survey Water-Supply Paper 1473. U.S. Govern. Printing Office, Washington p.176-178; y 287-309.

Hidrosud (1988) Desarrollo de la Actividad Termal. Informe 1, FONADEP, MTU, Uruguay.

INE (2004) Instituto Nacional de Estadística de Uruguay. <http://www.ine.gub.uy>.

Jackson TJ (2002) Remote sensing of soil moisture: implications for groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10:1.

Kimmelman E, Silva AA, Silva RB, Rebocas AC, Santiago MMF (1986) Hidrologia e Isotopia e Quimica do aquífero Botucatu – Bacia do Paraná- Brasil. Anais do 4 Congr. Bras. Ag. Subt., Brasília, 25.

Kimmelman E, Silva AA, Rebocas AC, Santiago MMF (1989) Analysis of Groundwater from Botucatu Aquifer System in Brazil. *Radiocarbon*, 31 (3).

Kittl Tage S (2000) Contributions to the knowledge on the stratigraphy and hydrochemical of the giant Guarani Aquifer System, South America, Curso Internacional de Hidrogeología Tropical impartido por el Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Trabajo Final de Master, (Inédito).

Lahermo P (1987) The occurrence and pathways of abnormally high fluoride concentrations in the environment and their impact on human health in northern Tanzania. *Elements and Disease Proc. on the first Int. Cont. on Elements*. pp: 30-43.

Langevin CD (2002) Stochastic groundwater flow simulation with a fracture zone continuum model. *Groundwater*, Vol. 41, No.5, 587-601.

Lavalin (2007) IV Taller de Coordinación Interna del Componente 1 y 6 del proyecto PSAG, Montevideo, Uruguay. 8-9 de octubre de 2007.

McDonald MG y Harbaugh AW (1988) A modular three-dimensional-finite-difference ground-water flow model. *Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey, part 2*, United States Government Printing Office, Washington

Medina A., Galarza G y Carrera J (1996) TRANSIN II. Fortran code for solving the coupled flow and transport inverse problem in saturated conditions. El Berrocal Project. Characterization and validation of natural radionuclide migration processes under real conditions on the fissured granitic environment. European Commission Contract n° FI2W/CT91/0080. Topical Report 16. ENRESA.

MGAP-MTOP-BIRF (Ministerio De Ganadería, Agricultura y Pesca, Ministerio De Transporte Y Obras Públicas, Banco Mundial de Desarrollo) (1995) Estudio del Acuífero



Salto. Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego, MGAP, MTOP, BIRF y CONSUR. Uruguay.

Montaño J (1990) Carta Geológica del Uruguay a escala 1/100.000, Hoja H-12 Cuchilla del Ombú. Convenio Facultad de Agronomía, Facultad de Ciencias, Dirección Nacional de Minería y Geología. Montevideo. Uruguay.

Montaño J y Carrión R (1990) Optimización de la explotación del sistema acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó-Buena Vista. Anais 6º Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas. Trabajo N° 44, pp. 181-189.

Montaño J, Pessi M (1985) Estudio hidrogeológico de Rivera. OSE Montevideo, Uruguay.

Montaño J, Tujchneider O, Auge M, Fili M, Paris M, D'Elfa M, Pérez M, Naghi M, Collazo P, Decoud P (1998) Acuíferos regionales en América Latina, Sistema Acuífero Guaraní, Capítulo Argentino-Uruguayo. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión, U.N.L., Santa Fe, Argentina. 217 pp.

Nicolli HB, O'Connor J, Suruno ML, Koukharsky MA, Gomez Peral LM, Bertini IM, Cohen LI, Corradi OA, Baleani EG (1985) Geoquímica del Arsénico y otros Oligoelementos en Aguas Subterráneas de la Llanura sudoriental de la Provincia de Córdoba. Academia Nacional de Ciencias, Miscelánea 71, Córdoba, Argentina.

OEA (2004) El recurso invisible Acuíferos transfronterizos: una oportunidad de cooperación internacional. Series sobre elementos de políticas, número 3.

Oleaga A (1998) Ensayo de bombeo en Termas de Daymán (Inédito). Uruguay.

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, De los Santos J (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.

OMM - Organización Meteorológica Mundial (1997) Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo.

OSE (1993) Planilla de ensayo de bombeo final en la perforación termal de Salto. Uruguay.

Pacheco VF (2004) Informe Final: Estudio Hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en la zona Rivera – Sant'Ana do Livramento. II Curso Internacional de Hidrología Subterránea (Versión a Distancia). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Perea D, Martínez S (1989) Nueva localidad fosilífera para el Cuaternario del Norte del Uruguay. Boletín de la Sociedad Zoológica del Uruguay. Montevideo. Uruguay. Ameghiniana 22: 185-196. Buenos Aires. Argentina.

Perez A, Rocha L (2002) Aportes al conocimiento del acuífero Guaraní. Área Ciudad de Rivera – Uruguay. Groundwater and Human Development Conference. XXXII International Congress of the International Association of Hydrogeologists. Oct/02. Mar del Plata, Argentina.

Pessi M, Hardy G (1998) El Sistema Acuífero Tacuarembó en la ciudad de Rivera, Uruguay. 4º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. ALHSUD, Montevideo, Uruguay. pp. 460-468.

Pompêo C (2000) Técnicas de estimativa da Recarga subterrânea. Revista Ciência e Tecnologia, Depto. De Engenharia Sanitaria e Ambiental, Universidade Federal do São Carlo, Brasil.

Rebouças, A.C. (1976), Recursos hídricos da Bacia do Paraná. São Paulo, Tese de Livre Docência, IGc/USP, 143p., 2 mapas.

Rodríguez L, Gómez A, Oleaga A, Pacheco F, Roullier G, Seoane N, Silva Busso A, Vives L (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.

Rushton K, Ward C (1979) The estimation of groundwater recharge. Journal of Hydrology, Vol. 41.

SAG (2004) Informe de Gestión Local Inicial del Proyecto Piloto Rivera - Santana do Livramento. [http://www.sg-guarani.org/index/site/proyecto\\_particular/pp001d.php](http://www.sg-guarani.org/index/site/proyecto_particular/pp001d.php)

SAG (2006) Servicios de Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní - Segundo informe geológico del proyecto PSAG. <http://www.sg-guarani.org/index/site/proyecto/pto006c.php>

SAG (2007). Página web del Proyecto Sistema Acuífero Guaraní. <http://www.sg-guarani.org/>

Santa Cruz J (2000) Environmental Management of the Water Resources and Application of Geosciences in Argentine Republic. 31st International Geological Congress, General Symposia, CPRM, Río de Janeiro Brasil. Abstracts Volume in CD HTM2028.

Scanlon BR, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, Vol. 10:1.

Selroos J, Walker D, Strom A, Gylling B, Follin S (2002) Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock. J. Hydrol. 257:174-188.

Silva RB (1983) Estudio Hidroquímico e Isotópico das águas subterrâneas das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de Sao Paulo. Tesis Dout., Univ. De Sao Paulo.

Silva Busso A (1997) Estratigrafía y Correlación de los Niveles Mesozoicos de las Captaciones del Agua Termal de la Región Mesopotámica Argentina y Litoral Uruguayo, Congreso Internacional Sobre Aguas, apartado II-3, UBA, UNESCO, Buenos Aires, Argentina.

Silva Busso A (1999) Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanaense Oriental Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, UBA.

Silva Busso A (2003) Aspectos Hidroquímicos y evaluación de reservas del Sistema Acuífero Guaraní en el Área Argentino-Uruguayo. Revista AIDIS Ingeniería Sanitaria, Argentina N°69 Pag 51-56.

Silva Busso A, Fernández Garrasino C (2004) Presencia de las Formaciones Piramboiá y Botucatú (triasico – jurasico) en el subsuelo oriental de la Provincia de Entre Ríos, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina N°59 (1): 141-151.

Silva Busso A, Olivares O, Fresina M (1999) Afectación del Acuífero Freático por Uso del Suelo en un Área del Conurbano Bonaerense, Prov. Buenos Aires, Argentina Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, México. Vol: 3 N°1, pag 32-45.

Silva Busso A, Santa Cruz J (2003) Hidroquímica, Contaminación y Vulnerabilidad de las Aguas Subterráneas en el Partido de Escobar, Buenos Aires, Argentina. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Rosario, Santa Fe, Argentina Actas Tomo 2 pg: 353-362

Sprechmann P, Bossi J, Da Silva J (1981) Cuencas del Jurásico y Cretácico del Uruguay. Volkheimer W & Musacchio E (Ed.) Cuencas Sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur: 239 – 270. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico, 351 pág., Buenos Aires.

Stanford W (2002) Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeology Journal, Vol. 10:1.

Svenson U (2001) A continuum representation of fracture networks. Part I: Method and basic test cases. J. Hydrology 250: 170-186.

Tahal (1986) Proyecto Agrícola de Riego basado en la perforación de pozos profundos. Tomo 2, 4 y 5. Tahal Consulting Engineers, VERNON, ROU.

UNESCO (2001) Internationally Shared (Transboundary) Aquifer Resources Management. Their significance and sustainable management. A framework document. IHP-VI, Non Serial Documents in Hydrology. Paris, France.

Vassolo S (2005) Modelo hidrogeológico y numérico del sector oriental del Paraguay. Presentación en el Taller SAG-PY. Asunción, Paraguay. 19-20 septiembre, 2005.

Vassolo S (2007) Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en el sector oriental del Paraguay. Informe Final Proyecto Sistema Acuífero Guaraní en cooperación con la Secretaría del Ambiente (SEAM). Asunción, Paraguay.

Vázquez-Suñé E, Castro A (2002) Planilla Easy-Bal - Curso Internacional de Hidrología Subterránea (versión a distancia, Barcelona, España).

Velásquez L, Carvalho Filho C, Camargos C, Branco O, Rodrigues P, Minardi P, Migliorini R, Santos Cota S, Bomtempo V, Bertol G, Diaz J (2007) Informe Final del proyecto “Avaliação dos recursos hídricos do Sistema Aquífero Guaraní no Município de Araguari, Minas Gerais, Brasil”, Fondo de Universidades, Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.

Vives L, Campos H, Candela L, Guarracino L (2001) Modelación del acuífero Guaraní. Boletín Geológico y Minero, Vol. 112, No. Esp., 51-64.

Vrba J (1991) Mapping of groundwater vulnerability Intl. Asoc. Of Hydrogeologists, Ground Water Protection Comisión, an unpublished working paper for meeting in Tamp, FL, USA, 35p.

Vrba J, Zaporozec A (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability International Association of Hydrogeologist-International Contributions to Hydrogeology 16.

Vries JJ, Simmers J (2002) Groundwater Recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeology Journal, Vol. 10:1.

Walther K (1911) Uber Permotriassische Sandsteine und Eruptivdecken aus dem Norden der Republik Uruguay. Neues Jahrbuch Mineralogie, Geologie und Palaontologie, Beilage Band 31: 575 609, Stuttgart.

Waterloo Hydrogeologic Inc (2005) Visual Modflow User`s Manual, versión 4.1.0, Waterloo, Canadá.

Wood W (1999) Use and misuse of the Chloride-Mass Balance Method in estimating groundwater recharge. Ground Water, Vol. 37:1.

Wood WW, Rainwater KA, Thompson DB (1997) Quantifying macropore recharge: Examples from a semi-arid area. Ground Water, Vol. 35:6.

Zaporozec A (1993) Ground water vulnerability mapping practices in the United States Wis. Geological and Natural History Survey (open file report).

Zheng C, Bennett G (1995) Applied contaminant transport modelling – Theory and Practice. Ed. Van Nostrand Reinhold, USA.

# **ANEXO I**

## **Tareas de Campo**

## **ANEXO I: Tareas de Campo**

A continuación se describen cada una de las ocho salidas a campo y las principales actividades realizadas.

### **Agosto 2004**

Durante los días 8-9 se realizó una visita de reconocimiento a la zona de Rivera/Sant'Ana y de Artigas-Quaraí. En la localidad de Rivera se entrevistó al Ing. Royol, responsable de la firma Tecnoagua, principal perforista de la zona. Además se mantuvo una reunión informativa con la Comisión Contragua, ONG interesada en diversos temas del complejo urbano Rivera/Sant'Ana, y una entrevista con periodistas de la emisora de televisión local, Canal 10, con el fin de divulgar las actividades del proyecto.

Se recorrió la ruta entre Rivera y Artigas y se documentaron fotográficamente diversos aspectos de interés: usos del suelo (intensa actividad forestal), coladas basálticas depositadas sobre las areniscas, zona de afloramiento de areniscas midiéndose el ángulo de inclinación de los estratos, zona de contacto areniscas/basaltos, cursos de agua superficial y formas del relieve, alcanzándose la zona topográficamente más elevada de la región. Cada sitio fotografiado fue georeferenciado para su posterior identificación en la cartografía básica.

### **Septiembre 2004**

Entre los días 3 y 7 se recorrió la zona de Rivera-Sant'Ana con el fin de divulgar el proyecto en las respectivas comunidades, realizar un reconocimiento más

detallado, revisar y recopilar la información disponible tanto en organismos públicos como en empresas privadas instaladas en la zona.

#### **Noviembre 2004**

Se realizaron las siguientes tareas:

- Censo de pozos en el área uruguaya.
- Acotamiento satelital de pozos con GPS diferenciales (método estático rápido donde se acotaron 14 puntos). Las mediciones fueron realizadas con 2 GPS marca ASTEC modelo ZSURVEYOR propiedad de la DINAMA (Dirección Nacional de Medio Ambiente de Uruguay).
- Medición de niveles piezométricos en 12 pozos, medición de parámetros hidroquímicos “in situ” y toma de 6 muestras para análisis en laboratorio.
- Reuniones con los actores locales.
- Análisis de los datos obtenidos en campaña.

#### **Marzo 2005**

Se realizó entre los días 3 y 7. El trabajo de campo abarcó las localidades de Artigas-Quarai y Rivera-Sant´Ana, teniendo tres objetivos principales:

- Rectificación de la imagen satelital del área de estudio: para este proceso se relevaron con GPS de mano 25 puntos de control en el terreno consistentes en elementos físicos y antrópicos de fácil reconocimiento en la imagen satelital.
- Reconocimiento de perforaciones: se confeccionó una planilla resumen teniendo en cuenta: identificación de las perforaciones; coordenadas y formas de

acceso; profundidad del nivel de agua (m) en boca de pozo; caudal de extracción (l/h); posibilidad de muestreo; conductividad eléctrica (uS/cm), TDS (sales totales disueltas), temperatura (°C) y pH; observaciones.

- Reconocimiento en el campo de las diferentes litologías aflorantes y toma de muestras: como complemento se realizó la descripción visual de las muestras y se tomaron sus respectivas coordenadas. Además, se individualizaron áreas de contacto entre las areniscas de Tacuarembó y los basaltos de Arapey.

## **Mayo 2005**

Se realizó entre los días 4 y 8. El objetivo principal fue la búsqueda y el análisis de datos de perforaciones, principalmente en la zona de afloramientos de basaltos en Brasil, debido a la carencia de información sobre esta formación con relación a los objetivos del proyecto en el sector uruguayo. Con estas tareas se completó el censo de perforaciones realizado previamente.

Por un lado se recurrió a los datos proporcionados por DAE de la localidad de Sant'Ana do Livramento, y por otro a la base de datos disponible en Internet confeccionada por el Centro de Pesquisas em Recursos Mineráis (CPRM), en convenio con instituciones de Canadá ([www.siagas.cprm.gov.br](http://www.siagas.cprm.gov.br)).

A partir de ahí se trató de visitar e inspeccionar visualmente la mayor cantidad de pozos posibles.

## **Agosto 2005**

Se llevó a cabo entre los días 15 y 21. Durante los primeros 4 días de campaña se visitaron los pozos de OSE y de DAE dado que se necesitaba la presencia de



operarios autorizados para la apertura de las instalaciones de las perforaciones. Con posterioridad se relevaron los pozos particulares.

Una de las principales tareas fue el acotamiento satelital de los pozos restantes en la localidad de Rivera y de la totalidad de los pozos en territorio brasilero. Esto se realizó en cooperación con otro de los proyectos del Fondo de Universidades, que trabaja en la misma zona de estudio, proyecto que aportó los fondos para solventar los gastos del agrimensor involucrado, y con quienes se compartieron los resultados.

Se trabajó con el mismo instrumental que en la campaña de noviembre 2004, es decir con receptores GPS, marca ASHTECH, modelo Z-SURVEYOR. Los equipos contaban con controladores, antenas y nivel óptico de línea Wild. El procesamiento de la información se realizó mediante el software de procesamiento de datos GPS, Ski 2.3, de Leica y el software de modelación geoidal MAPGEO2004, del IBGE, Brasil.

Se realizó un relevamiento GPS diferencial, modo estático rápido, a tales efectos se consideró como punto de referencia el vértice 1941N (91938) del IBGE (Brasil), para el cual se dispone de coordenadas en el Sistema SIRGAS. A los fines de determinar las alturas de los puntos, se utilizó el modelo geoidal desarrollado por el IBGE, asimismo se efectuaron observaciones en vértices de nivelación pertenecientes a las redes de nivelación de ambos países.

Las transformaciones de coordenadas a los sistemas locales, uruguayo y brasilero, se efectuaron utilizando los parámetros de transformación calculados por el IBGE (Brasil) y los desarrollados por el Ing. Roberto Pérez Rodino (Facultad de Ingeniería, UDELAR) para el Uruguay.

Se describen aquí las características de los sistemas coordenados de ambos países aportados por el agrimensor. Se recuerda que el sistema uruguayo es el que se utiliza a lo largo de todo este proyecto.

A) Sistema Uruguayo.

Sistema de coordenadas ROU-USSAMS

Elipsoide: Internacional de 1924

Datum horizontal: Yacaré

Datum vertical: Nivel medio en el Puerto de Montevideo (Decreto 20/5/1949)

Proyección cartográfica: Transversa Mercator

Meridiano de contacto: 55° 48' W

Latitud de origen: 90° S

Falso Este: 500.000

Falso Norte: 0

Factor de escala en el meridiano central: 1

B) Sistema Brasileiro.

Sistema de coordenadas SAD69

Elipsoide: Sudamericano de 1969

Datum horizontal: SAD-69

Datum vertical: Imbituba

Proyección cartográfica: UTM

Zona: 21

El muestreo hidroquímico planificado en un principio en el proyecto contemplaba la toma de aproximadamente 30 muestras, tanto en el área uruguaya como brasilera. Debido a cuestiones de índole técnica en las condiciones de ciertas perforaciones (existencia de grifo, posibilidad de apertura con llaves manuales, bombas que se encendían automáticamente, pozos sellados, etc.) sólo se pudieron muestrear 16 pozos. Es importante mencionar que los pozos muestreados en la localidad de Rivera son únicamente aquellos pertenecientes a propietarios particulares, ya que OSE no permitió muestrear pozos de su dependencia.

En cada pozo se captaron aproximadamente 4 lt. de agua, 3 para su posterior análisis en laboratorio, y 1 para el ensayo de alcalinidad que debía realizarse dentro de las 24 hs de tomada la muestra. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de DINAMA. Los parámetros fisicoquímicos que se solicitaron al laboratorio son: pH, conductividad, residuo seco a 180°, STD, calcio, sodio, magnesio, potasio, alcalinidad, cloruros, sulfato, nitrato, manganeso, hierro, flúor, arsénico y sílice.

Al igual que para el muestreo no se pudo medir niveles piezométricos en todos los pozos acotados. En total se acotaron 42 pozos y se midieron niveles en 17 de ellos.

Los últimos dos días de campaña se llevó a cabo la clasificación supervisada de las categorías identificadas en el mapa de uso de suelos.

## **Diciembre 2005**

Entre los días 2 y 6 se llevó a cabo la última campaña de medición de niveles piezométricos y de muestreo hidroquímico en el área de estudio.

En dicho período se realizaron 38 mediciones de nivel, casi exclusivamente en perforaciones con acotamiento geodésico satelital antecedente. Las mediciones

incluyeron sitios de diversa índole, incluyendo perforaciones en ambos países y que explotaran los tres acuíferos detectados, basaltos, somero y profundo en areniscas.

Desde el punto de vista de la información generada, posiblemente esta campaña sea la que generó la más amplia información piezométrica del área de estudio, ya que incluyó perforaciones tanto privadas como de las empresas de abastecimiento de agua potable, OSE y DAE. Es importante remarcar que esta campaña ha sido la única en la cual se ha permitido a personal externo a la OSE la medición de nivel en los pozos. Ello se pudo realizar únicamente durante las noches y midiendo solo en aquellas perforaciones que pudieran ser sacadas de operación sin alterar el suministro de agua potable a la población, ya que en ese momento se estaba en una situación muy ajustada para el abastecimiento público del lado uruguayo.

Aunque se alcanzó un número muy importante de pozos medidos, 38, se pretendía alcanzar las casi 50 mediciones, pero debido a que el último día dedicado a medir en pozos de DAE no fue posible operar debido a que se quemaron varias bombas y el sistema de abastecimiento estaba muy exigido y no había posibilidad de detener ningún pozo por un plazo de al menos 48 hs.

Debido a que algunos pozos se encontraban en explotación al llegar al sitio, se realizaron cuatro ensayos de recuperación de corta duración, aproximadamente 1,5 hs, lo que permitió generar información adicional a la simple medida de nivel.

Además de lo indicado, se tomaron 17 muestras de agua para su análisis en laboratorio. En campo se realizó la medición de Temperatura, Conductividad eléctrica, pH y Alcalinidad, mientras que en laboratorio se midió pH, Conductividad eléctrica, residuo seco a 180°C, Sólidos totales, silicatos, sulfatos, cloruros, nitratos, fluor, sodio, potasio, magnesio, calcio, manganeso, hierro y arsénico.

# **ANEXO II**

## **Tablas**

Tabla 1.a: Perforaciones en Sant'Ana do Livramento, Brasil (DAE, 1995).

ID del pozo	Alias	Tipo de pozo	LOCALIZACIÓN				Empresa Const.	CARACTERÍSTICAS DEL POZO										EQUIPAM.		ACUIFERO		
			Propietario	Coord. SGMU (Uruguay)		Diam. (pug)		Profundidad (m)	Prof. NE (m)	Revestimiento		Filtro		Prefiltro	Prof. ND (m)	Rebaje (m)	Q ensayo (m <sup>3</sup> /h)	Q específica (m <sup>3</sup> /h/m)	Depósito (m <sup>3</sup> )	Form (Fm) Grupo (Gr)	Tipo	Litología
				Long. W	Lat N					O (pol)	Long. (m)	O (pol)	Long. (m)									
1	PST-1(a)	T/M	W. Protillago Cia. Ltda.	528982	6586497		8,00	4,00		8,00	4,00							2,50	BO	Li	Ar	
2	CF-1(a)	T/M	Clementino Farias	529882	6589238		8,00	17,00		8,00	17,00					5,00		0,25	BO	Cu	Ba/Ar	
3	H-8(*)	T	DAE	528099	6584438	CPRM	20,00	118,00	48,80	12,00	82,98	12,00	33,04	Sin	74,00	27,40	80,00	2,92		BO	Li	Ar
4	LU-1(*)	T	DAE	527888	6584305	Hidrotecnica	10,00	102,00	42,00	10,00	72,00	10,00	30,00	Sin	72,00	30,00	80,00	2,00	270,00	BO	Li	Ar
5	AC-2(*)	T	DAE	524853	6585013		17,00										30,00		750,00	BO	Li	Ar
6	KE-1(*)	T	DAE	527383	6586892		10,00												240,00	BO	Li	Ar
7	RE-2(*)	T	DAE	524311	6588309	Sondágua		38,00		10,00	17,84	10,00	18,38				90,00		1.000,00	BO	Li	Ar
8	SB-1(*)	T	DAE	528088	6588900	CPRM	17,50	105,00	8,50	10,00	75,00	10,00	30,00	Sin	48,10	37,80	43,20	1,15	300,00	BO	Li	Ar
9	W-1(*)	T	DAE	529237	6588382	V. de Angola	10,00	140,00	19,45						84,50	45,05	20,00	0,44	48,00	BO	Li	Ar
10	BR-1(*)	T	DAE	528188	6587001	T. Janér	17,50	90,00	0,10	10,00	47,00	10,00	42,80		33,10	33,00	80,00	1,82	200,00	BO	Li	Ar
11	AR-5(*)	T	DAE	529111	6584790	Sondágua	10,00	90,00	7,00	10,00	61,88	10,00	24,24		33,00	28,00	80,00	2,31	550,00	RS	Li	Ar/Pe
12	AL-2(*)	T	DAE	530705	6587218	CORBAN	8,00	58,00	11,00						52,82	41,82	8,40	0,20	200,00	BO	Li	Ar
17	LTA-1	T	Lan. T. Albormoz	525739	6583871		8,00	105,00	40,00	8,00	80,50				55,00	15,00	35,00	2,33	40,00	BO	Li	Ar
18	LTA-2	T	Lan. T. Albormoz	525889	6583911		8,00	110,00	80,00	8,00	110,00			Sin			32,00		40,00	BO	Li	Ar
19	LTA-3	T	Lan. T. Albormoz	528115	6586157		8,00	95,00	45,00	8,00									25,00	BO	Li	Ar
20	LTC-1	T	Liv. Tennis Club	525510	6583729	Sondágua	8,00	100,00	35,00	8,00	20,00				45,00	10,00	40,00	4,00	4,00	BO	Li	Ar
21	BIOL-1	T	Siel - Cons. V W	525428	6584138		8,00	34,00	12,00	8,00	28,00								2,00	BO	Li	Ar
22	9CS-1	T/M	Soc. Cruz Sul	523479	6588807		8,00	8,00	1,70	4,00	7,00	4,00	1,00	Sin	5,00	3,30				BO	Li	Ar
23	9CS-2	T	Soc. Cruz Sul	523809	6588649		8,00	28,00	8,50	4,00	28,00			Sin	10,50	4,00	10,00	2,50	10,00	BO	Li	Ar
24	9CS-3	T	Soc. Cruz Sul	525882	6583890		8,00	28,00	8,40	4,00	28,00					1,00		2,00	BO	Li	Ar	
25	PRQ-1	T/M	Raul Godinho	527588	6585001		8,00	42,00	4,50	8,00					8,00	3,50	15,00	4,28	25,00	BO	Li	Ar
26	CT-1	T	Chumasc. Trevo	527577	6585061		8,00	25,00	2,00	8,00	25,00			Sin	8,00	4,00	4,00	1,00	1,00	BO	Li	Ar
27	PBJ-2	T	Oriovaldo D. Gomes	528824	6584413		4,00	19,00	3,20	4,00	10,00	4,00	1,00	Sin					10,00	BO	Li	Ar
28	PE-1	T	Staevia Cia. Ltda.	528282	6583597		8,00		8,30	8,00	12,00									BO	Li	Ar
29	CCE-3 (*)	T	Cidade	530183	6583649			80,00												BO	Li	Ar
30	CCE-1	T	Cidade	529913	6583646		10,00	90,00	11,00	10,00					40,00	29,00	54,00	1,88	1.140,00	BO	Li	Ar
31	CCE-2	T	Cidade	530181	6582838		12,00	70,00	20,00	12,00					45,00	25,00	52,00	2,08	1.140,00	RS	Li	Ar/Pe
32	CCE-4	T	Cidade	529654	6583552	Comer	12,00	100,00	14,50	12,00				Sin	31,10	18,80	80,00	3,81	1.140,00	BO	Li	Ar
33	CCE-5	T	Cidade	529650	6583932	Comer	18,00	100,00	10,00	12,00	58,00	12,00	42,00		50,00	4,00	30,00	0,75	1.140,00	BO	Li	Ar
34	CCE-8	T	Cidade	529751	6583844	Comer	12,00	125,00	7,00	12,00	85,00	12,00	40,00		58,00	49,00	40,00	0,81	1.140,00	BO	Li	Ar
35	CCE-7	T	Cidade	529885	6583495	Hidrotecnica	17,00	180,00	15,00	10,00	120,00	10,00	40,00	Sin	71,00	58,00	80,00	1,07	1.140,00	BO	Li	Ar
36	PBJ-1	T	Oriovaldo D. Gomes	524090	6583795		8,00	18,00	9,00	8,00	10,00				17,00	8,00	4,20	0,52	5,80	BO	Li	Ar
37	2RPMon-1	T	Brigada Militar	528918	6583284		8,00	89,00	37,50	8,00	77,00	8,00	12,00	Sin					5,00	BO	Li	Ar
38	7RCMec-1	T	Ejército Brasileiro	528081	6584895	Coperbras	8,00	70,00		8,00	70,00	8,00					9,00		20,00	BO	Cu	Ba/Ar
39	JL-1	T	João Linhares	528213	6587328	Sec. Agric	8,00	88,00	20,00	8,00	12,00	8,00			35,00	15,00	1,50	0,1	7,00	BO	Li	Ar
40	JGG-1	T	João G. Gonçalves	528243	6587297		8,00	85,00		8,00	85,00								3,00	BO	Li	Ar

Tabla 1.a: Perforaciones en Sant'Ana do Livramento, Brasil (DAE, 1995). Continuación.

41	LB-1	T	Lauro Binafeld	527372	8587349		8,00	23,00	17,00	8,00						1,00		1,00	BO	Li	Ar	
42	RDS-1	T	Roberto D. Saez	527293	8587329	Cemape	8,00	45,00	35,50	8,00	12,00					3,00		1,00	BO	Li	Ar	
43	HM-1	T	Heitor Martini	528825	8587085		8,00	40,00	11,00	8,00	38,00			Sim	14,00	3,00	8,80	2,2	10,00	BO	Li	Ar
44	CFS-1	TIM	Clari F. Silva	523018	8587083		8,00	18,00	11,00	8,00	9,00									BO	Li	Ar
45	JCC-1	TIM	J. C. Cremonini	523488	8588042		8,00	18,00	13,50	8,00	9,00									BO	Li	Ar
46	MF-1	TIM	Neirno Farias	523833	8587189		8,00	21,00	19,00	8,00	9,00									BO	Li	Ar
47	FJM-1	TIM	Firno J. Moraes	523550	8587458		8,00	20,00	13,00	8,00	8,00				16,00	3,00	1,50	0,5	0,25	BO	Li	Ar
48	JA-1	TIM	Jose Amada	523924	8587038		8,00	35,00	29,50	8,00	20,00									BO	Li	Ar
49	FR-1	TIM	Floresando Ribeiro	524478	8588018		8,00		8,00	8,00										BO	Ca	Ba/Ar
50	GN-1	TIM	Gaspar Nobre	524784	8587171		8,00	14,00	2,00	8,00	14,00									BO	Li	Ar
51	PF-1	TIM	Paulo Fronteira	524885	8587083		8,00	12,00	8,00	8,00	12,00									BO	Li	Ar
52	EM-1	TIM	Eliseu Moraes	523592	8588339		8,00	9,00	7,50	8,00	9,00					1,20		0,50	BO	Li	Ar	
53	JF-1	TIM	Juanes Furtado	523228	8585985		8,00	32,00		8,00	30,00					1,50		1,00	BO	Ca	Ba/Ar	
54	APM-1	TIM	Alberto P. Martins	523894	8587130		8,00	18,00	8,00	8,00	18,00					3,00				BO	Li	Ar
55	ER-1	TIM	Elisabela Rodriguez	529035	8588207		8,00	12,00	10,00											BO	Li	Ar
56	JM-1	TIM	Jesus Moraes	529428	8585917		8,00	22,00	8,00	8,00	12,00			Sim		4,00		1,00	BO	Li	Ar	
57	JCM-1	TIM	J.C. Machado Motta	528848	8585939		8,00	30,00	18,00	8,00	18,00					0,30		0,50	BO	Li	Ar	
58	ASD-1	TIM	Antonio Severo Dias	529483	8585488		8,00	18,00	8,00	8,00	18,00			Sim						BO	Li	Ar
59	AMA-1	TIM	Azir M. Azevedo	528519	8585835		8,00	9,00	3,00	8,00	9,00							0,25		BO	Li	Ar
60	CVC-1	TIM	Candido V. Chaima	528403	8588170		8,00	12,00	8,00	8,00	1,00							0,25		BO	Ca	Ba/Ar
61	CAV-1	TIM	Camara A. Vieira	528788	8587215		8,00	12,00	9,00	8,00	8,00									BO	Li	Ar
62	DS-1	TIM	Davil Schmitt	528788	8587414		8,00	14,00	12,00	8,00	4,00									BO	Li	Ar
63	MB-1	TIM	Marta O. Bencourt	529935	8588227		8,00	8,00	3,30	8,00	3,00									BO	Li	Ar
64	GG-1	TIM	Gilberto Gomes	530015	8588208		8,00	5,30	1,50	8,00	5,30									BO	Li	Ar
65	EP-1	E	Eloir V. Peres	530670	8585744		39,40	7,00	5,50	39,40	4,00							0,50		BO	Li	Ar
66	IF-1	TIM	Irma G. Fernandes	530427	8585082		8,00	18,00	12,00	8,00	8,00									BO	Li	Ar
67	DMS-1	TIM	Darci M. Soares	530139	8585090		8,00	18,00	13,00	8,00	8,00									BO	Li	Ar
68	JPE-1	TIM	J. Pedro Elguy	529577	8584142		8,00	7,00	5,50	8,00	4,00							0,95		BO	Li	Ar
69	RA-1	TIM	Rodolfo Almada	529112	8583887	Rodolfo Almada	8,00	9,00	3,00	8,00	8,00									BO	Li	Ar
70	PG-1	TIM	Pedro J. V. Garcia	529398	8583350		8,00	7,00	3,00	8,00	4,50									BO	Li	Ar
71	JSS-1	TIM	Jose S. Sandin	528887	8583242	Rodolfo Almada	8,00	14,00	1,35	8,00										BO	Li	Ar
72	BO-1	E	Bianca Ortiz	529248	8582358	Rodolfo Almada	39,40	9,00	8,00	39,40	8,00									RS	Li	Ar/Pe
73	HG-1	TIM	Hercules Goncalves	528244	8583508		8,00	7,00	2,50	8,00	7,00									BO	Li	Ar
74	ML-1	TIM	Mariano Lopes	527849	8583024		8,00	12,00		8,00	12,00									BO	Li	Ar
75	MP-1	TIM	Martin Padem	527992	8582705		8,00	12,00	8,35	8,00	12,00									BO	Li	Ar
76	LA-1	TIM	Luis Almeida	527834	8582581		8,00	23,00	13,50	8,00								0,50		BO	Li	Ar
77	EG-1	TIM	Eronildo Graeff	529222	8588885	Eronildo Graeff	5,00	31,00	23,00	5,00	18,00					1,50		0,50		SG	Fi	Ba
78	MF-1	E	Marcel Flores	525084	8588174		39,40	5,00	2,50	39,40	5,00									BO	Li	Ar
79	IV-1	TIM	Idelvira Vasquez	525410	8588558		8,00	25,00	23,00	8,00	8,00									BO	Li	Ar
80	LV-1	TIM	Leonel S. Vila	525974	8587134	Leonel Vila	8,00	11,80	9,00	8,00	8,00									BO	Li	Ar





Tabla 1.b: Perforaciones en Rivera, Uruguay (OSE).

SERVICIO	ESTRUCTURA	ALIAS	FECHA HABILIT.	PROFUNDIDA D (m)	NIVEL DINAMICO	NIVEL ESTATICO	NIVEL SUCCION	CAUDAL DISEÑO	TUBERIA IMPULSION	CAUDAL ACTUAL	PRESION kg/cm2	HORARIO PROMEDIO
RIVERA	PERF. 724/1	Planta adentro	1960	65,48	18,20	9,65	22,29	100	4"	43	3,50	20
	PERF. 724/2	Quintas al Norte	06/02/1965	73,60	27,60	18,70	34,01	100	4"	27	1	20
	PERF. 1226/5	Cerro del Marco	23/12/1982	68	42,30	23,50	46,02	19	2,1/2'	14	6	24
	PERF. 1226/6	Hospital	26/03/1983	75,6	32,60	10,40	45,42	20	3"	5	4	24
	PERF. 1367/2	Mandubi 1	22/09/1989	18,1	8,30	1,90	14,60	7,5	1,1/2'	9	5,80	1
	PERF. 1367/3	Santa Teresa 1	05/04/1992	60	21,40	18,00	x	4,2	1,1/2'	3,70	3	1
	PERF. 1368/2	La Virgencita 2	15/10/1994	34,6	30,60	23,70	x	5	1,1/2'	1,80	1,50	24
	PERF. 1508/6	La Pedrera 1 (Policinica)	04/01/1994	54	22,00	16,70	27,00	7,5	2"	5,60	3,20	14
	PERF. ESC. 86	Escuela de Cerro Caqueiro	03/03/1992	52,2	x	x	x	4	1,1/2'	4,00	2,20	1
	PERF. 10.4.001	Lagunon 1	29/03/1985	119,18	73,00	x	78,30	58	4"	27	5,50	15
	PERF. 10.4.002	Lagunon 2	02/06/1989	120	68,00	15,70	71,40	30	3"	20	9	13
	PERF. 10.4.003	Planta afuera	15/12/1986	111	38,80	14,45	57,35	53	4"	60	1	22,5
	PERF. 10.4.004	La Televisiva	14/06/1989	124,3	77,00	64,27	85,00	24	3"	22	5	24
	PERF. 10.4.005	El Hormigon	17/11/1989	129,5	52,02	13,05	62,81	48	4"	55	1	20
	PERF. 10.4.007	James Bond	23/12/1993	115	77,00	11,60	83,00	66	4"	36	4,50	24
	PERF. 10.4.008	La Deportiva	20/01/1992	118	74,60	3,50	81,00	25	3"	8	4	20
	PERF. 10.4.009	La Pedrera 2 (T.D.)	31/08/1993	50,26	24,60	22,20	37,00	6,4	1,1/2'	5	3,50	21
	PERF. 10.4.011	La Estiva	10/08/1993	x	72,00	12,30	78,00	26,5	3"	29	6,00	24
	PERF. 10.4.012	Mandubi 2 (T.D.)	12/06/1993	72	31,00	17,50	x	3	1,1/2'	4	3,20	15
	PERF. 10.4.015	La Virgencita 1(T.D.)	15/10/1994	x	x	x	x	x	1,1/2'	6	2,50	5
	PERF. 10.4.016	Rita (P. Gran Bretana)	08/01/1996	69	30,00	9,05	33,00	70	4"	60	6,00	24
	PERF. 10.4.017	Polo (Fondo)	07/12/1996	65	27,15	5,40	29,00	72	4"	60	6,00	13
	PERF. 10.4.018	Polo (entrada) R.R.	30/12/1996	60	32,60	5,80	34,00	60	5"	29,00	9,50	13
	PERF. 10.4.019	Malena	21/04/1995	92	x	21,3	x	24	4"	6	7	22
	PERF. 10.4.020	Mandubi 3 (Escuela)	20/12/1995	46	23	10,4	x	9,8	1,1/2'	6	3	1
	PERF. 10.4.021	Santa Teresa 2 (T.D.)	25/11/1896	56,3	25	22	49	6	1,1/2'	5	3	17
	PERF. 10.4.022	Cerro Caqueiro (T.D.)	09/09/1996	70,5	41	34	49	5	1,1/4"	4	2,2	7,5
	PERF. 10.4.023	Vaca Loca (Parque G.B. fondo)	27/09/1997	58	33	14	34,5	50	4"	39		24
	PERF. 10.4.025	La Furada (Parque G.Bretana)	26/10/1999	51,9	30,25	7,3	34	30	3"	21		
	PERF. 10.4.026	Cerro Caqueiro Norte 1	s/ hab									
PERF. 10.4.027	La Arenera (Mandubi 4)	01/03/1999	73,5	18	9	30	21	2"	18	3	15	

Tabla 2: Perforaciones relevadas en noviembre de 2004 (Pacheco, 2004).

ID Punto	Alias	Tipo acotamiento	Este (m)	Norte (m)	H (m)	Prof. (m)	NE (m)	Comentario
PT0001	Sandra Vaz	GPS diferencial MER	520771.66	6580308.51	210.40	8.00	202.40	-
PT0002	URUFOR P3	GPS diferencial MER	523065.10	6577831.96	217.11	11.50	205.61	Cota Ok. Profundidad aproximada
PT0003	URUFOR P2	GPS manual	523072	6578007	-	-	-	-
PT0004	URUFOR P1	GPS manual	523038	6577888	-	-	-	-
PT0005	Antonio Rodríguez	GPS diferencial MER	526004.79	6577745.18	234.96	22.50	212.46	-
PT0006	Hogar de Ancianos	GPS manual	524814	6580330	-	-	-	-
PT0007	Chacra Sarandi Universitario	GPS diferencial MER	526767.02	6580922.89	205.00	22.29	182.71	Cota error de aproximadamente 0,10 m
PT0008	Chacra Juan Carlos Berón – Livramento	Carta SGM	521600	6590000	285	18.65	266.35	-
PT0009	CONAPROLE P3	GPS diferencial MER	524276.63	6578560.26	220.20	18.50	201.70	-
PT0010	Marcelo Alvariza	GPS diferencial MER	528383.74	6578981.54	199.36	11.83	187.53	-
PT0011	Jorge María Dall'Orso	GPS diferencial MER	528712.68	6578364.23	199.22	14.10	185.12	-
PT0012	Campus Colegio Rodó	GPS diferencial MER	524951.98	6576742.56	227.09	4.00	223.09	-
PT0013	Flia Aréballo	GPS diferencial MER	528210.51	6579682.07	201.94	13.26	188.68	-
PT0014	Antonio Lopez	GPS diferencial MER	519871.65	6580249.66	259.21	8.80	250.41	-
PT0015	Chacra Capitán Avenatti	GPS diferencial MER	528537.25	6579189.18	209.32	25.65	183.67	-
PT0016	Abasto Municipal de Rivera	GPS diferencial MER	519771.48	6585389.563	221.45	18.95	202.50	Cota error de aproximadamente 0,20 m
PT0017	CONAPROLE P4	Carta SGM	524200	6578700	-	-	-	-
PT0018	Flia. Garcia	GPS manual	525647	6581465	-	-	-	-
PT0019	Chacra Policial	GPS manual	528678	6578419	-	-	-	-
PT0020	OSE Escuela Agraria	Carta SGM	524150	6578900	210	12.1	197.9	NE histórico
PT0021	Liceo Santa Isabel	Carta SGM	522300	6580700	-	-	-	-
PT0022	Estación de Servicio TEXACO	Carta SGM	525000	6580600	-	-	-	-
PT0023	Lagunas PT OSE	Carta SGM	525000	6579000	-	-	-	-
PT0024	OSE 10.4.007	Carta SGM	518400	6585650	250	11.6	238.4	NE histórico
PT0025	OSE 10.4.009	GPS manual	524399	6578399	-	-	-	-
PT0026	OSE 10.4.015	GPS manual	524185	6578070	-	-	-	-

MER=Método estático rápido - SGM=Servicio Geográfico Militar uruguayo

Tabla 3: Datos de niveles piezométricos y mediciones de campo, agosto de 2005.

Perforación	Localidad	Fecha	Prof. del agua (m.b.b.p.)	pH	COND. (mS/cm)	T° C	TDS (mg/l)
10.4.003	Rivera	16-ago					
10.4.001	Rivera	16-ago					
10.4.002	Rivera	16-ago					
10.4.025	Rivera	16-ago					
10.4.018	Rivera	16-ago					
10.4.023	Rivera	16-ago					
10.4.007	Rivera	16-ago					
P4	Rivera	16-ago					
H10	Santana	17-ago		7,23	178,4	19,6	123
Jardim do Verde	Santana	17-ago		7,99	159,3	20,7	110
AR 3	Santana	17-ago		5,39	139,5	19,3	97
AL-1	Santana	17-ago		7,52	227	19,3	157
W-3	Santana	17-ago		5,47	135,6	18,7	94
Panadería La Ideal 1	Santana	17-ago	34,58				
Panadería La Ideal 2	Santana	17-ago	13				
BR-1	Santana	19-ago	20,24				
BR-2	Santana	19-ago	26,2	7,49	300	19,2	207
RE-3	Santana	19-ago	14,315	4,95	116,1	18	80
AC-2	Santana	19-ago	31,32	5,75	113,9	19,6	79
PR-1	Santana	19-ago	22.43/22.16				
SB-1	Santana	19-ago		7,29	142,3	18,9	98
KE-2	Santana	19-ago		7,75	241	20,3	167
Beron	Santana	19-ago	18,75	7,55	490	18,4	338
Vila Umbú	Santana	19-ago		5,53	140,4	21,4	97
Policía caminera	Rivera	20-ago	15,97				
Monte Paz	Rivera	20-ago	32,5				
Vertedero Municipal	Rivera	20-ago	13,65				
Lavadero	Rivera	20-ago	37,74				
Santa Rita	Santana	20-ago	10,68				
Fernando Leites	Santana	20-ago	2,38				
10.4.036	Rivera	20-ago	12,28				
10.4.023	Rivera	20-ago	19,3				
PT0012	Rivera	20-ago	4,3				
PT0005	Rivera	20-ago	23				
PT0015	Rivera	20-ago	26,05				
PT0007	Rivera	20-ago	22,5				

Tabla 4: Perforaciones relevadas y acotadas, niveles piezométricos medidos y acuífero explotado, en diciembre 2005.

Pozo	Este	Norte	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Acuífero	NE (m) 12/2005	NE (m) 8/2005	NE (m) 11/2004
10.4.003 Planta Paysandú-afuera	523132	6583832	203,13	165	P	180,78		
10.4.001 Lagunón 1	521875	6584459	204,93	119	P	188,28		
10.4.002 Lagunón 2	521139	6584721	217,20	120	P			
10.4.025 La furada (PGB)	519363	6585030	212,55	52	P			
10.4.018 Polo (entrada)	519147	6585364	212,52	62	P		200,24	
10.4.023 Vaca Loca (PGB)	519597	6585868	221,31	55	P	200,67	202,01	
P4 (PGB)	518684	6585580	216,16					
10.4.036 Polo fondo	518742	6584935	212,79	178	P	197,79		
10.4.00?? Depuradora	524984	6579108	199,09	53	P	190,99		
1508/6 o 1367/1 La pedrera 1	524484	6578515	223,95	54				
10.4.009 La pedrera 2	524433	6578344	232,25	50	S			
10.4.015 La virgencita 1	524198	6578018	240,36	50	S	216,05		
10.4.030	524217	6578861	209,91					
10.4.032	524417	6577595	243,18					
10.4.027 La arenera-Mandubi4	523197	6578630	210,34	87	P			
10.4.035	527362	6581820	218,23	96	P			
10.4.028 Pirineos	526505	6581556	202,58	98	P	175,96		
10.4.037 Represa 1	517664	6586171	264,17	175	P	199,67		
10.4.031 Alicia	523492	6585266	266,47	164	P	180,80		
10.4.021	521284	6579246	230,58	56	S-P			
10.4.029- Caq. Norte	527646	6581546	221,22	192	P	173,12		
H10	526420	6582794	201,82	115	P	159,12		
Jardim do verde	527408	6582600	201,12	131	P	165,92		
AC1 (nombre mal, Alejandrina)	530303	6585299	193,65		P			
Wilson 3	529413	6586307	194,55	105	P			
Panadería 2 (Pozo profundo)	524940	6581666	217,41	75	P	181,18		
Lavadero Pedro Porto	525578	6582031	247,59	60	S	209,92	209,85	
Brasilia	528675	6584891	160,89		P	139,92	140,65	
BR2	528492	6585017	162,46	89	P		136,26	136,26
Registro 3 (RE3)	524310	6586357	180,77		P	165,57	166,46	
AC2	524662	6583907	197,44		P	164,34		
Vila Ombú	526447	6582609	221,15	84	P			
Prado 1	524590	6585967	193,69	121	P			
Simón Bolívar	528082	6587013	182,05	105	P			
Kenedy 2	527381	6584986	167,21					
PT0008-Berón	521907	6589434	266,72		B	247,97		248,07

continua....

Tabla 4: Perforaciones relevadas y acotadas, niveles piezométricos medidos y acuífero explotado, en diciembre 2005. Continuación.

Pozo	Este	Norte	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Acuífero	NE (m) 12/2005	NE (m) 8/2005	NE (m) 11/2004
Camínera	522704	6575648	243,32		S	227,91	227,35	
Montepaz	523951	6575772	236,39	66	S	204,05	203,89	
Vertedero municipal	525606	6578185	213,96	60	S-P	201,96	200,31	
Nieves	517640	6577351	244,68		S	217,69		
Leites	521701	6589022	256,26		B	253,91	253,88	
PT0001-Sandra vaz	520772	6580309	210,40	15	S	202,39		202,40
PT0002-Urufor P3	523065	6577832	217,11	78	S-P	202,38		205,61
PT0005-Antonio Rodríguez	526005	6577745	234,96	50	B-S	215,43	211,96	212,46
PT0007-Chacra Sarandí Universitario	526767	6580923	205,00	49	S-P	182,21	182,50	182,71
PT0009-Conaprole P3	524277	6578560	220,20	61	S-P	196,12		201,70
Marcelo Alvariza	528384	6578982	199,36		S-P	187,51	187,24	187,53
Jorge M <sup>a</sup> Dall'Orso	528713	6578364	199,22		P	185,25		185,12
Campus Colegio Rodó (Pozo Viejo)	524952	6576743	227,09		S	222,95	222,79	223,09
Flia. Aréballo	528211	6579682	201,94		S			188,68
Antonio López	519872	6580250	259,21		B	251,21		250,41
Chacra Capitán Avenati	528537	6579189	209,32	42	P	183,32	183,27	183,67
Matadero municipal	519771	6585390	221,45		S-P	202,91		202,50
Panadería 1 (Pozo somero)	524941	6581669	217,56		S	205,01		
Campus Colegio Rodó (Pozo Nuevo)	524991	6576782	227,79	50	S-P	213,83		
Flia. Aréballo (Pozo Nuevo)	528195	6579682	201,24	35	P	181,48		
Piscina Santa Rita	523027	6589161	205,44		P	194,11	195,06	
<b>Perforaciones sin acotamiento preciso</b>								
Ct-01-sli14	525740	6588331	221		P	199,67		
10.4.007	518400	6585650	216,91	135	P			
OSE Escuela Agraria	524150	6578900	210	80				
1367/3	521320	6579320	227	60	P	208,59		

Tabla 5: Datos de Bombeo.

Rivera				Santana		
Pozo	Año	Q diseño (m3/día)	Q actual (m3/día)	Pozo	Año	Q (m3/día)
724/1	1960	2000	860	CCE 1	1934	1296
724/2	1965	2000	540	CCE 2	1939	1248
1226/5	1982	456	336	LTA 1	1951	840
1226/6	1983	480	120	Wilson 1	1960	360,54
10.4.001	1983	870	405	LTC 1	1960	960
10.4.003	1986	1192,5	1350	SCS 3	1960	24
1367/2	1989	7,5	9	CCE 3	1963	1440
10.4.002	1989	390	260	LTA 2	1965	768
10.4.004	1989	576	528	H3	1967	771,43
10.4.005	1989	960	1100	CCE 5	1970	720
1367/3	1992	4,2	3,7	AC 1	1971	1584
esc 86	1992	4	4	PRG 1	1971	360
10.4.008	1992	500	160	CCE 6	1972	960
10.4.007	1993	1584	864	AR 2	1972	2376
10.4.009	1993	134,4	105	JF 1	1973	36
10.4.011	1993	636	696	APM 1	1974	72
10.4.012	1993	45	60	CT 1	1975	96
10.4.021	1993	102	85	RE 1	1977	895,71
1368/2	1994	120	43,2	JL 1	1977	36
1508/6	1994	105	78,4	BR 1	1978	676,79
10.4.015	1994	139,2	132	H4	1980	395,72
10.4.019	1994	528	132	Vila Umbú	1981	363,21
10.4.022	1995	37,5	30	RE 2	1981	1465,71
10.4.016	1996	1680	1440	CF 1	1981	120
10.4.017	1996	936	780	AR3	1982	455,71
10.4.018	1996	780	377	LB 1	1982	24
10.4.020	1996	9,8	6	FJM 1	1982	36
10.4.023	1996	1200	936	RDS 1	1984	72
10.4.025	1997	720	446,4	HM 1	1984	158,4
10.4.027	1998	315	270	BR 4	1985	1555,36
10.4.026	1999	48		BR 2	1987	337,14
10.4.028	1999	230,4		PP1	1987	144
10.4.029	1999	336	321,6	EM 1	1987	28,8
10.4.030	2000	480	268,8	JM 1	1987	96

Tabla 5: Datos de Bombeo. Continuación.

Rivera				Santana		
Pozo	Año	Q diseño (m3/día)	Q actual (m3/día)	Pozo	Año	Q (m3/día)
10.4.031	2001	720		Kenedy 2	1989	977,5
10.4.034	2001	408		H2	1989	1385,71
10.4.033	2002	600		H7	1989	1194,64
				Vila Luiza	1990	774,29
				Alexandrina 1	1990	797,14
				Simon Bolívar	1990	459,29
				AC 3	1990	1437,85
				Cidade Carajás	1990	36
				AC4	1990	1791,97
				AL 1	1990	1680
				PSJ 1	1990	100,8
				RE 3	1991	753,57
				H6	1991	387,14
				H10	1991	1096,43
				Jardim do Verde 3	1993	1230
				AL 2	1993	201,6
				7RCMec 1	1993	216
				SCS 2	1994	240
				CCE 7	1995	1440