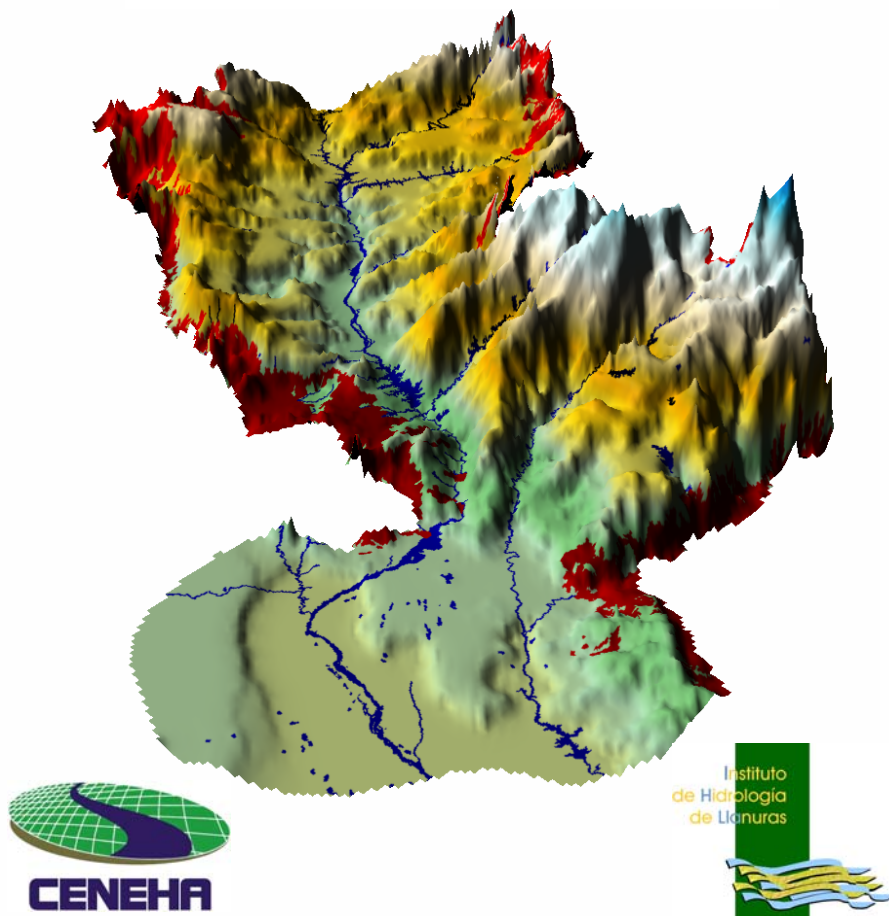




## MODELACION NUMÉRICA REGIONAL DEL SISTEMA ACUIFERO GUARANÍ

Ref.: SBCC/01/04 – 1/1018.1 Servicios de Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní



### INFORME FINAL

Empresas Participantes:

Tahal Consulting Engineers Ltd., Seinco S.R.L., Hidroestructuras S.A.,  
Hidrocontrol S.A., Hidroambiente S.A.

**hidrocontrol s.a.**  
CONSULTORÍA Y SERVICIOS



HIDROESTRUCTURAS S.A.



**TAHAL**  
Israel



**SEINCO**



**ARCADIS** hidro ambiente s.a. ®



La ejecución del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní es posible gracias al acuerdo de cooperación alcanzado entre los gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, el aporte financiero del Global Environment Facility (GEF) y otros donantes, la cooperación técnica y financiera del Banco Mundial que es la agencia implementadora de los Fondos GEF y la Secretaría General de la Organización de Estados Americanos (SG/OEA) en su condición de agencia ejecutora regional.

El contrato "Servicios de Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní - Ref.: Licitación SBCC/01/04 – 1/1018.1" fue realizado en el marco del Proyecto Acuífero Guaraní dentro de la Componente 1, destinada a la expansión y consolidación de la base de conocimiento científico y técnico existente acerca del Sistema Acuífero Guaraní. Este contrato fue adjudicado al Consorcio Guaraní compuesto por las empresas:

Tahal Consulting Engineers Ltd., Seinco S.R.L., Hidroestructuras S.A.,  
Hidrocontrol S.A., Hidroambiente S.A

Dirección: Bartolomé Mitre 1480 / 602, Montevideo.

Tel-fax: (598-2) 915.33.63.

Coordinador Técnico: Dr. Gerardo Veroslavsky

El Consorcio Guaraní subcontrató para la Modelación Numérica Regional del Sistema Acuífero Guaraní al Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) perteneciente a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires Azul, Argentina. El IHLLA desarrolló esta tarea en conjunto con el Centro de Estudios Hidroambientales de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Los resultados, interpretaciones, conclusiones, denominaciones y opiniones vertidas en este informe y la forma en que aparecen son responsabilidad exclusiva de los autores y no implican juicio alguno sobre las condiciones jurídicas de los países, territorios, ciudades o zonas, o de actividades diversas, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites, por parte de los países beneficiarios, ni de la Secretaría General de la OEA (SG/OEA), ni de la Secretaría General del Proyecto

Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina, noviembre, 2008



## Equipo del Proyecto

### Responsables Nacionales

Por Argentina  
Por Brasil  
Por Paraguay  
Por Uruguay

Fabián López  
Eustaqui Luciano Zica  
Carlos López Dose  
Víctor Rossi

### Coordinadores Nacionales:

Argentina

Miguel Ángel Giraut  
María Josefa Fioritti (Co-coordinadora)  
María Santi (Co-coordinadora)  
João Bosco Senra  
Adriana Niemeyer Pires Ferreira (Co-coordinadora)

Brasil

Paraguay  
Uruguay

Amado Insfrán  
Lourdes Batista

### Representantes OEA:

Jorge Rucks  
Carlos Sténeri

### Representantes Banco Mundial:

Abel Mejía  
Douglas Olson  
Samuel Taffesse

### Secretaría General:

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

Luiz Amore  
Jorge Santa Cruz (Gerente de Servicios)  
Daniel H. García Segredo  
Roberto Montes  
Alberto Manganelli  
Luis Reolón  
Virginia Vila  
Mathias González  
Diego Lupinacci  
Patricia Guianze

### Facilitadores proyectos piloto:

Concordia – Salto  
Rivera – Santana  
Itapúa  
Ribeirão Preto

Enrique Massa Segui  
Achylles Bassedas  
Alicia Eisenkölbl  
Mauricio dos Santos



## **Equipo Responsable de la Modelación Numérica Regional del Sistema Acuífero Guaraní**

### **Coordinación**

Prof. Dr. Luis Vives

Instituto de Hidrología de Llanuras - IHLLA

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires – UNCPBA

Azul, Argentina

<http://www.ihlla.org.ar>

### **Equipo Técnico**

Prof. Dra. Leticia Rodríguez y Msc. Andrea Gómez

Centro de Estudios Hidroambientales - CENEHA

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - FICH

Universidad Nacional del Litoral – UNL

Santa Fe, Argentina

<http://www.unl.edu.ar/ceneha>

### **Apoyo Técnico – Fortalecimiento Institucional – Secretaría General**

Dra. Stela Dalva Santos Cota

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN

Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN – Brasil

Técnico Cristian Enrique Garabua

Dirección de Catastro, Secretaría de Planificación y Obras Públicas

Municipalidad de Concordia, Argentina





# **MODELACION NUMÉRICA REGIONAL DEL SISTEMA ACUIFERO GUARANÍ**

## **RESUMEN EJECUTIVO**

El presente documento corresponde al informe final de las actividades de “Elaboración del modelo numérico regional del Sistema Acuífero Guaraní” propuestas en el Contrato de Locación Intelectual de Servicios Profesionales de la Empresa HIDROESTRUCTURAS al Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) dentro del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, “Servicios de Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní” (HGTMR). El IHLLA desarrolló esta actividad en conjunto con el Centro de Estudios Hidroambientales de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

El modelo conceptual y el modelo numérico constituyen la síntesis del funcionamiento hidráulico del SAG condicionado por una compleja geología, los controles estructurales, la recarga directa proveniente de la precipitación e indirecta de los basaltos fracturados/alterados, la interacción con formaciones infrayacentes, la interacción del flujo subterráneo y superficial en zonas de afloramiento, las descargas a través de los bordes acuífero, la potencial descarga hacia los ríos Paraguay y Uruguay y otros sumideros, y la explotación para diversos usos.

El modelo numérico de simulación del flujo subterráneo, realizado con los códigos TRANSIN y VISUALTRANSIN, fue estructurado en una serie de componentes: dominio de modelación y malla, recarga, bombeo, zonas de permeabilidad, condiciones de borde, interacción acuífero/río y pozos de observación de niveles. Sólo se simula el denominado SAG operativo sin incluir las formaciones infra y suprayacentes, y es de carácter continuo en toda su extensión sin incluir explícitamente elementos estructurales.

Las simulaciones permitieron validar en general el modelo conceptual propuesto, probar hipótesis alternativas de controles del flujo, identificar zonas del dominio de modelación que presentan deficiencias de información e incertidumbre, y valorar la influencia del incremento de las explotaciones en dos zonas críticas y de una hipotética distribución de la recarga por un período de 100 años.



Las principales conclusiones de la modelación regional son: la dirección predominante del flujo regional es de norte y este hacia el centro de la cuenca; los gradientes hidráulicos simulados resultan en general similares a los del modelo conceptual, teniendo presente que el mapa potenciométrico integra niveles medidos en un intervalo de 20-30 años; el borde occidental de afloramiento es una región de recarga local y de descarga tanto regional como local; numerosos cursos superficiales en zonas de afloramiento podrían ser vías de descarga del acuífero, al menos de los niveles más someros, reduciendo la recarga profunda; las conductividades hidráulicas calibradas tienden a ser mayores a las reportadas en antecedentes, posiblemente debido a que el modelo no representa las unidades infra y suprayacentes; la hipótesis de descarga regional del SAG a través de tramos de los ríos Uruguay y Paraná resulta plausible y compatible con las demás componentes del balance de masa; la hipótesis de flujos ascendentes desde el SAG hacia las formaciones suprayacentes en un sector localizado resulta plausible en virtud de las grandes discontinuidades litológicas presentes; los términos dominantes del balance de masa son la recarga y la descarga hacia los ríos (para las simulaciones estacionarias, las explotaciones suman 29 % de la recarga); los flujos del balance de masa serían pequeños; los efectos del incremento de la explotación son notorios e inmediatos en sitios cercanos al bombeo, y se registran en forma escalonada en el tiempo a medida que uno se aleja de la explotación; se mostró la potencialidad y necesidad de calibrar el modelo en régimen transitorio, fundamental para el gerenciamiento sustentable de los recursos subterráneos en acuíferos con baja tasa de renovación.

Una de las mayores incertidumbres que aún persisten en el modelo conceptual, y por lo tanto en el numérico, es la zona de descarga del sistema regional y en general la magnitud de los flujos de agua en el sistema. Las hipótesis de las posibles alternativas de descarga son variadas, aunque deben analizarse en mayor profundidad con metodologías alternativas para reducir las incertidumbres.

Finalmente, a pesar del avance significativo del proyecto en general y de la modelación en particular, es necesario continuar y profundizar el análisis de la geología y las estructuras, además de la información isotópica e hidrogeoquímica que no fue integrada al modelo conceptual para así confirmar/descartar algunas hipótesis de funcionamiento para así incrementar la confiabilidad del modelo conceptual y por ende la del modelo numérico.



## Índice

1. Introducción	1
2. Metodología	5
3. Código TRANSIN y VISUALTRANSIN	7
3.1 Ecuación del flujo	7
3.2 Teoría del Problema Inverso. Función Objetivo	9
3.3 Código Numérico TRANSIN	11
3.4 Programa VISUALTRANSIN	13
4. Modelo conceptual	14
4.1. Comportamiento del SAG en los contornos	17
4.2. El SAG operativo como medio continuo	18
5. Estructura del modelo	20
5.1. Dominio de modelación	20
5.2. Zonas de conductividad	22
5.3. Zonas de recarga	23
5.4. Zonas de bombeo	25
5.5. Tratamiento de la interacción río-acuífero	27
5.6. Condiciones de contorno en el borde	30
5.7. Niveles observados o medidos	31
6. Resultados de la modelación	33
6.1. Escenario 1: conductividad uniforme	33
6.2. Escenario 2: Zonificación 2 de la conductividad	36
6.3. Escenario 3: Zonificación 3 de la conductividad	37
6.4. Escenario 4: Zonificación 4 de la conductividad	38
6.5. Escenario 5: Zonificación 5 de la conductividad	38
6.6. Escenario 6: Descarga a través de los basaltos	39



6.7. Análisis del efecto de las estructuras	40
6.8. Análisis transitorio	41
6.9. Análisis de resultados	43
7. Simulación de escenarios	47
8. Conclusiones, recomendaciones y líneas futuras	53
8.1. Conclusiones	53
8.2. Recomendaciones y Líneas futuras de Investigación	55
Agradecimientos	57
Bibliografía	58
Anexo I: Sistemas de proyección	61
Anexo II: Análisis de las explotaciones	64
Anexo III: Análisis de la piezometría	75
Anexo IV: Resultados	78
Anexo V: Asistencia a reuniones o talleres	131



## Lista de Figuras

1.1	Límite premodelo y modelo actual	2
2.1	Esquemática del proceso de modelación (Carrera Ramírez y Sánchez Vila, 1994)	5
4.1	Mapas de Isópacas (LEBAC, 2008)	16
4.2	Mapa de Isotermas (LEBAC, 2008).	16
4.3	Mapa potenciométrico (LEBAC 2008)	16
4.4	Condiciones de contorno del SAG (LEBAC, 2008). Descarga o salida; recarga o ingreso y condición de no flujo	18
4.5	Perfiles geológicos longitudinal y transversal, tomados de LEBAC (2008)	19
5.1	Representación discreta del dominio de modelación	20
5.2	Malla de elementos finitos. Localización de las zonas A y B de mayor detalle	21
5.3	Detalle de la malla de elementos finitos en las zonas A y B	22
5.4	Zonificaciones de conductividad hidráulica	24
5.5	Zonificación de la recarga	25
5.6	Ubicación de pozos de explotación y zonificación de los pozos utilizada en el modelo	26
5.7	Detalle de la zonificación en zona de mayor explotación	27
5.8	Ríos simulados explícitamente	29
5.9	Condiciones de borde externa del modelo numérico	30
5.10	Puntos de observación seleccionados para el proceso de calibración del modelo	32
6.1	Error medio y flujo ríos para diferentes tasas de recarga Permeabilidad uniforme - Modo simulación. Escenario 1.	34
6.2	Conductividad hidráulica calibrada. Escenario 1.	35
6.3	Error medio y flujo ríos para diferentes tasas de recarga Permeabilidad calibrada - Modo calibración. Escenario 1.	35
6.4	Función de tiempo aplicada a la tasa de recarga.	42
6.5	Proceso de calibración – Evolución del error medio	44



6.6	Balance de masa global	45
6.6	Flujo en ríos seleccionados	46
7.1	Precipitación anual serie 1901-2001 en punto de grilla cercano a Rivera-Santana	48
7.2	Función de tiempo para la serie anual 1901-2001	48
7.3	Ubicación de puntos virtuales o de control	49
7.4	Hidrogramas de pozos virtuales o de control del 1 al 8	51
7.5	Hidrogramas de pozos virtuales o de control del 9 al 13	52



## Lista de Tablas

5.1	Ríos simulados con su número de zona	28
5.2	Condiciones de contorno en el borde con su número de zona.	31
6.1	Balance de masa global (m <sup>3</sup> /s)	45
7.1	Principales ciudades en zonas de bombeo empleadas en la predicción	47



## 1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de lograr una gestión y desarrollo sustentables del SAG, el Global Environmental Facility (GEF) apoyó financieramente a los cuatro países que comparten el recurso para llevar a cabo el “Proyecto de Protección Ambiental y Desarrollo Sustentable del Sistema Acuífero Guaraní”. La Organización de Estados Americanos (OEA) actuó como unidad ejecutora, mientras que el Banco Mundial tuvo a su cargo la administración del proyecto.

La ejecución del proyecto se dividió en dos bloques temáticos: 1) Servicios de Inventario, Muestreo, Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica, Isótopos e Hidrogeología localizados en las áreas operativas Norte y Sur del Sistema Acuífero Guaraní, e 2) Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional. SNC-Lavalin y asociadas tuvo a su cargo el primer bloque, mientras que al Consorcio Guaraní, integrado por las empresas de consultoría Tahal Engineers Ltda. (Israel), Seincos SRL (Uruguay), Hidrocontrol S.A. (Paraguay), Arcadis Hidroambiente S.A. (Brasil) e Hidroestructuras S.A. (Argentina), le correspondió el desarrollo del segundo bloque. Uno de los productos comprometidos por el Consorcio es el Modelo Numérico Regional del SAG.

Junto con el modelo conceptual, el modelo numérico constituye la síntesis del funcionamiento hidráulico del SAG condicionado por una compleja geología, la presencia de controles estructurales de diferentes escalas espaciales, la recarga directa proveniente de la precipitación e indirecta de los basaltos fracturados/alterados, la interacción con formaciones infrayacentes, la interacción del flujo subterráneo y superficial en zonas de afloramiento, las descargas a través de los bordes del acuífero, la potencial descarga hacia los ríos Paraguay y Uruguay y otros sumideros, y la explotación para diversos usos.

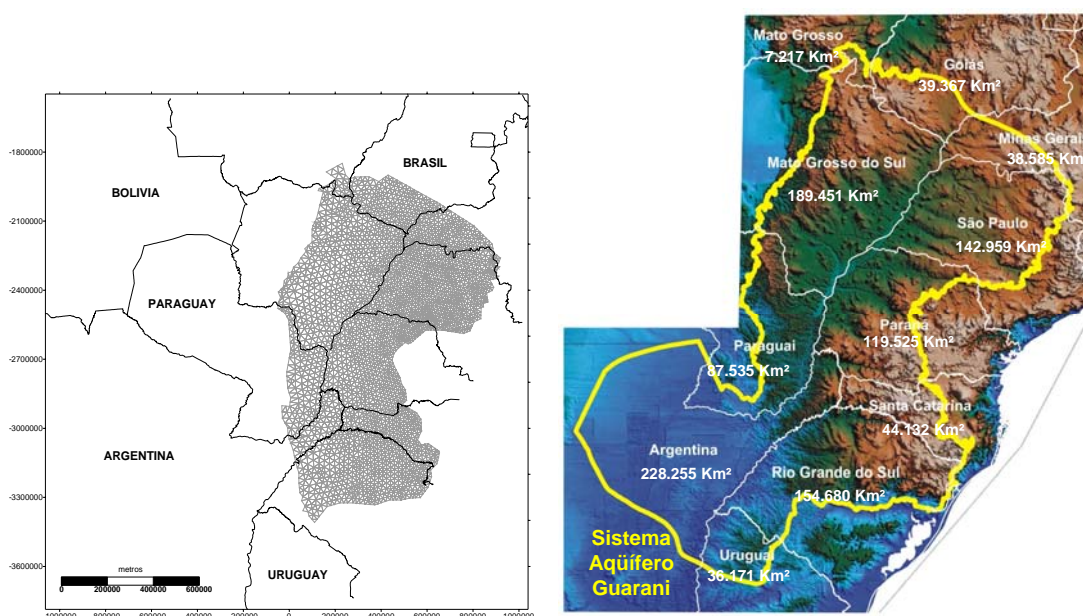
El objetivo principal del modelo regional es validar el modelo conceptual propuesto y además, sobre la base de una calibración adecuada cuyos criterios deben definirse a priori, transformarse en una herramienta valiosa de gestión y manejo del recurso. Sin embargo, otro de los objetivos que persiguen los modelos numéricos es poner de manifiesto aquellas zonas del dominio de modelación que presentan las mayores deficiencias de información e incertidumbre, y de ser posible, valorar su influencia en la capacidad de predicción del modelo. Asimismo





pueden señalar aquellas características del modelo conceptual que deben revisarse de tal manera de incrementar la confiabilidad de los resultados de las simulaciones.

El modelo conceptual, sobre el cual se sustenta el modelo numérico, representa una hipótesis de funcionamiento del sistema de las varias posibles, y por ende es de carácter cualitativo. En teoría podrían construirse tantos modelos numéricos como modelos conceptuales existan, estos últimos resultantes de la integración de más o menos información antecedente y de campo y de la consecuente interpretación de los respectivos especialistas. Este constituye el primer modelo completo de todo el SAG, extendiendo el área anteriormente modelada (Vives et al. 2001) y definiendo el denominado SAG operativo (LEBAC, 2008) dejando fuera de la definición a ciertas unidades que tradicionalmente se asociaban al mismo en trabajos previos. La Figura 1 muestra los límites de ambos modelos.



**Figura 1.1.** Límite premodelo (izq.) y modelo actual (der.).

El modelo numérico de simulación del flujo subterráneo, realizado con los códigos TRANSIN y VISUALTRANSIN, está estructurado en una serie de componentes: dominio de modelación y malla, recarga, bombeo, zonas de permeabilidad, condiciones de borde, interacción acuífero/río y pozos de observación de niveles. Sólo representa el denominado SAG operativo sin incluir las



formaciones infra y suprayacentes, de carácter continuo en toda su extensión sin incluir explícitamente elementos estructurales.

El proceso de calibración del modelo consiste en la búsqueda del conjunto de parámetros (transmisividad, tasa de recarga, etc) que brinde el mejor ajuste entre valores observados y simulados de niveles piezométricos. Los parámetros deben ser consistentes con estimaciones previas de los mismos en tanto que los resultados numéricos estarán influenciados tanto por las incertidumbres de los parámetros como por las de las medidas de niveles. Por ejemplo, el mapa de niveles piezométricos que debería sintetizar las direcciones regionales y locales de flujo, la presencia de sistemas locales y el esbozo de zonas de explotación más intensa, fue construido mayormente con datos de niveles medidos en el momento de la construcción de los pozos. Por ende estas medidas abarcan una ventana temporal de 20-30 años y la superficie piezométrica resultante no sería representativa de niveles actuales, en particular en zonas de grandes explotaciones, aunque sí podría considerarse representativo regionalmente. Además, debido a las características constructivas de los pozos, algunas medidas pueden representar valores piezométricos integrados, esto es no pertenecen a una formación particular sino a la interacción entre varios niveles verticales. De ser posible, debe valorarse la certeza de las mismas para acotar su influencia en la definición del modelo conceptual y por ende en los resultados numéricos.

El modelo numérico es capaz de reproducir el patrón regional de flujo, con dirección predominante norte-este hacia el centro del dominio y numerosos sistemas locales de recarga/descarga en las zonas de afloramiento en la periferia del sistema fuertemente influenciados por el bombeo, la recarga de las precipitaciones y la interacción acuífero/río. Sin embargo, una de las mayores incertidumbres que aún persisten en el modelo conceptual, y por lo tanto en el numérico, es la zona de descarga del sistema regional y en general la magnitud de los flujos que conforman el balance de masa. Las hipótesis acerca de las posibles alternativas de descarga son variadas, y van desde tramos de los ríos Uruguay y Paraná, formaciones infrayacentes de variada permeabilidad, zonas de fracturamiento de los basaltos, y seguramente otras por explorar.

El presente documento corresponde al informe final de las actividades de "Elaboración del modelo numérico del Sistema Acuífero Guaraní" propuestas en el Contrato de Locación Intelectual de Servicios Profesionales de la Empresa

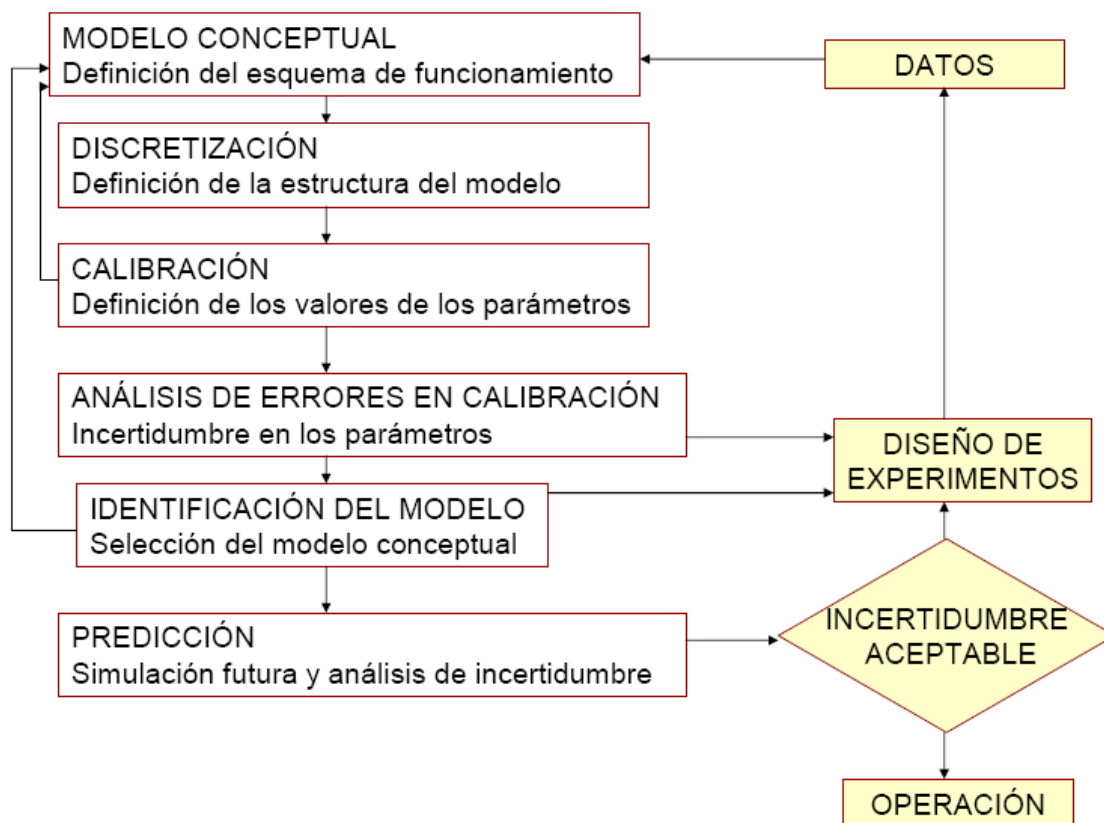


HIDROESTRUCTURAS al IHLLA-UNCPBA dentro del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, “Servicios de Hidrogeología General, Termalismo y Modelo Regional del Acuífero Guaraní” (HGTMR), N° de Referencia SBCC/01/04-1/1018.1.



## 2. METODOLOGÍA

La construcción de un modelo incluye una serie de pasos, resumidos en la Figura 2.1 (Carrera Ramírez y Sánchez Vila, 1994). El primero de ellos es la construcción del modelo conceptual del funcionamiento del acuífero, desarrollado a partir de datos disponibles y estudios antecedentes, y que sirve de base para la posterior modelación numérica. Discretización es el proceso de transformar el área de estudio en un conjunto de puntos discretos donde posteriormente se calcularán los niveles piezométricos y eventualmente concentraciones si se resuelve el problema de transporte de solutos. Además involucra la definición de la estructura del modelo, esto es las ecuaciones que gobiernan el flujo, las capas a ser simuladas, el régimen de explotación, las condiciones de borde, etc.



**Figura 2.1.** Esquemática del proceso de modelación (Carrera Ramírez y Sánchez Vila, 1994).

Durante el proceso de calibración, sea ésta manual o automática, se ajustan los valores de los parámetros de tal manera de encontrar el mejor ajuste entre los



valores observados y calculados de niveles piezométricos. A medida que el proceso de calibración avanza, el modelo conceptual inicial puede sufrir modificaciones que surgen del análisis de los resultados que se van obteniendo del modelo numérico, en un proceso de retroalimentación. Como resultado de la calibración se obtiene el modelo conceptual y numérico que resulta más coherente con los datos disponibles.

Así y todo este modelo está sujeto a incertidumbres debidas a la falta de datos completos de ciertos parámetros. Un análisis de errores, consistente en un análisis de sensibilidad, permite cuantificar estas incertidumbres. En algunos casos puede ser necesario realizar nuevos ensayos o experimentos, así como obtener datos adicionales para mejorar el modelo conceptual.

Una vez seleccionado un modelo conceptual y numérico se procede a realizar la simulación o predicción de la evolución futura para las distintas hipótesis que se contemplan. Los resultados de la simulación se deben complementar con el correspondiente análisis de incertidumbre. Si los resultados de este análisis conducen a incertidumbres aceptables se procede a la operación.

Con excepción de la elaboración del modelo conceptual, en este trabajo se siguieron las etapas clásicas de modelación de flujo de agua subterránea mostradas en la Figura 2.1 con el objetivo principal de validar el modelo conceptual de funcionamiento del sistema a escala regional e identificar aspectos que se deberán investigar con mayor detalle para aumentar la confiabilidad del mismo.

El modelo conceptual actual no integra toda la información de campo recientemente generada (por ejemplo, isotópica e hidrogeoquímica) debido a que fue procesada con posterioridad a la entrega del producto "Modelo conceptual". Por lo tanto el modelo conceptual disponible constituye una de las muchas interpretaciones posibles acerca del funcionamiento hidráulico del SAG, en consecuencia se construyeron varios modelos numéricos basados en diferentes hipótesis conceptuales, tal como se describe más adelante.

La modelación se realizó con el código TRANSIN (Medina and Carrera, 1996), que permite simular el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos. Con el fin de avanzar rápidamente en el proceso de modelación, inicialmente se trabajó con el preproceso y postproceso de datos a través del código INTRANSIN-III (Vives, 1994), y posteriormente se implementó el modelo en la interfaz gráfica amigable VISUAL TRANSIN.



### 3. CÓDIGO TRANSIN – VISUAL TRANSIN

Para simulación del flujo de agua subterránea se empleó el Código TRANSIN (Medina and Carrera, 1996; Medina et al., 1996). Este programa fue desarrollado por el Grupo de Hidrogeología e Hidrogeoquímica del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, de la Universidad Politécnica de Cataluña. <http://www.h2ogeo.upc.es/>.

La calibración manual de todos los parámetros de flujo y/o transporte a partir de valores medidos de niveles piezométricos y/o concentraciones suele ser larga, tediosa y, sobre todo, incompleta. Para limitar estas dificultades, TRANSIN permite realizar la calibración de forma automática, minimizando una función objetivo que tiene en cuenta no sólo el ajuste entre valores medidos y calculados de niveles piezométricos y concentraciones, sino también la plausibilidad de los parámetros calculados. La calibración automática, conocida como Problema Inverso, se obtiene por métodos estadísticos basados en maximizar la verosimilitud de los errores de la estimación, cuyos detalles se pueden ver en Carrera y Neuman (1986).

#### 3.1. Ecuación de flujo

El flujo en los acuíferos está gobernado por la conocida ecuación:

$$\nabla \cdot (\mathbf{T} \cdot \nabla h) + q + q_L = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{en } \Omega \quad (3.1)$$

donde  $h$  es el nivel piezométrico ( $L$ ),  $\mathbf{T}$  es el tensor de transmisividad ( $L^2/t$ ),  $S$  es el coeficiente de almacenamiento (adim.),  $\Omega$  es el dominio bidimensional,  $\nabla$  es el operador gradiente ( $1/L$ ),  $q$  es el término fuente y/o sumidero distribuido superficialmente (recarga o extracción) ( $L^3/L^2t$ ), y  $q_L$  representa las entradas/salidas de los acuitardos situados por encima y/o por debajo del acuífero ( $L^3/L^2t$ ).

La ecuación (3.1) se resuelve con las condiciones iniciales:

$$h(x, y, 0) = h_o(x, y) \quad (3.2)$$



donde  $h_o$  puede ser cualquier función arbitraria, o la solución de la ecuación (3.1) para una simulación anterior, frecuentemente en régimen estacionario. Si se analizan ensayos de bombeo,  $h_o$  puede asumirse igual a cero en todo el acuífero, en cuyo caso  $h$  representa las variaciones del nivel o descensos.

Las condiciones de contorno son de la forma:

$$(\mathbf{T} \cdot \nabla \mathbf{h}) \cdot \mathbf{n} = \alpha(H - h) + Q \quad \text{en } \Gamma \quad (3.3)$$

donde  $\Gamma$  es el contorno de  $\Omega$ ;  $\mathbf{n}$  es el vector unitario normal a  $\Gamma$  y dirigido hacia el exterior;  $H$  es el nivel prescripto;  $Q$  es un caudal prescripto ( $L^3/Lt$ ); y  $\alpha$  es un coeficiente que controla el tipo de condición de contorno ( $\alpha=0$  para caudal fijo,  $\alpha=\infty$  para nivel fijo, y  $\alpha \neq 0$  para condición mixta, en cuyo caso  $\alpha$  es un coeficiente de goteo) ( $L^2/t$ ).

El flujo en los acuitardos queda definido por la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h'}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h'}{\partial t} \quad \text{en } (z_i, z_j) \quad (3.4)$$

donde  $z$  es la coordenada perpendicular al plano de los acuíferos,  $h'$  es el nivel piezométrico en los mismos,  $K_z$  es la conductividad en la dirección de  $z$ ,  $S_s$  es el almacenamiento específico y,  $z_i$  y  $z_j$  son las coordenadas correspondientes a los acuíferos  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo, respectivamente.

El acoplamiento entre las ecuaciones (3.1), correspondiente a los acuíferos, y (3.4), correspondiente a los acuitardos, se realiza igualando los flujos y niveles en la interfaz. Esto es,

$$h'(x, y, z_i, t) = h_i(x, y, t) \quad (3.5)$$

$$q_{Li} = K_z \left. \frac{\partial h'}{\partial z} \right|_{z=z_i^+} - K_z \left. \frac{\partial h'}{\partial z} \right|_{z=z_i^-} \quad (3.6)$$



donde, de nuevo, el subíndice  $i$  identifica el acuífero. En relación con (3.6), el primer término del segundo miembro representa el flujo desde (o hacia) el acuitardo superior, y el segundo desde (o hacia) el inferior.

### 3.2. Teoría del Problema Inverso. Función objetivo.

El Problema Inverso consiste en estimar los parámetros del modelo (conductividades hidráulicas  $\mathbf{K}$ , coeficientes de goteo  $\alpha$ , fuente y/o sumidero  $\mathbf{Q}$ , caudal prescrito  $Q$ , nivel prescrito  $H$ , etc.) a partir de medidas de la respuesta del sistema y de la información previa de dichos parámetros apropiadamente ponderada.

Existen diversas formulaciones estadísticas del problema inverso pero la que se utiliza aquí es la teoría de Máxima Verosimilitud (MV) (Benjamin y Cornell, 1970), en la que los parámetros se tratan como fijos pero desconocidos. Para definir la verosimilitud es necesario especificar el vector de datos  $\mathbf{z}^*$  (niveles y/o concentraciones en los puntos de observación y estimación previa de los parámetros), y la estructura de los errores. La teoría de MV considera a las variables de estado (niveles y/o concentraciones) como aleatorias, por ende las observaciones de las mismas tendrán un error también de carácter aleatorio, de distribución normal, con media cero. Estas hipótesis permiten encontrar una expresión para la función objetivo como la que se presenta más abajo. Entonces, se adopta que  $\mathbf{z}$  sigue una distribución normal multivariada con media nula, por lo que queda completamente definida con la matriz de covarianza. Con frecuencia es conveniente suponer que las covarianzas pueden expresarse mediante (Carrera and Neuman, 1986):

$$\mathbf{C}_h = \sigma_h^2 \mathbf{V}_h; \quad \mathbf{C}_i = \sigma_i^2 \mathbf{V}_i; \quad \mathbf{C}_c = \sigma_c^2 \mathbf{V}_c \quad (3.7)$$

donde  $\mathbf{C}_h$ ,  $\mathbf{C}_i$  y  $\mathbf{C}_c$  son las matrices de covarianza de los errores de niveles, los parámetros del tipo  $\mathbf{p}_i$  ( $i = \mathbf{K}, S_s, q, H, Q$  y  $\alpha$ ) y concentraciones,  $\mathbf{V}_h$ ,  $\mathbf{V}_i$  y  $\mathbf{V}_c$  son matrices conocidas y definidas positivas, y  $\sigma_h^2$ ,  $\sigma_i^2$  y  $\sigma_c^2$  son escalares desconocidos. Sea  $\mathbf{w}$  el vector compuesto por los parámetros del modelo  $\mathbf{p}_i$  y los estadísticos de la función de distribución de los parámetros. Con estas hipótesis





anteriores, la verosimilitud de  $\mathbf{w}$ , dado  $\mathbf{z}^*$  (probabilidad de ocurrencia de  $\mathbf{z}^*$  si los parámetros y el modelo fuesen ciertos), es:

$$L(\mathbf{w}/\mathbf{z}^*) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} |\mathbf{C}|^{-\frac{N}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{z} - \mathbf{z}^*)^t \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{z}^*)\right) \quad (3.8)$$

donde  $N = n_h + n_c + \sum_i n_i$ ,  $n_h$  y  $n_c$  es el número total de datos de niveles y concentraciones, respectivamente,  $n_i$  es el número total de parámetros del tipo  $i$  con información previa,  $\mathbf{C}$  es la matriz de covarianza de  $\mathbf{z}^*$ , las  $n_h$  primeras componentes de  $\mathbf{z}$  representan los niveles  $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ , las siguientes  $n_c$  concentraciones (calculados con los parámetros  $\mathbf{p}_i$ ) en los puntos y tiempos de observación, mientras que las restantes componentes son los propios parámetros  $\mathbf{p}_i$  de los que se dispone de información previa. Dado que la estimación previa de  $\mathbf{p}_i$  suele ser independiente de los datos incógnita (niveles y concentraciones), puede suponerse, sin pérdida de generalidad, que  $\mathbf{C}$  es de la forma:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_h & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_c & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_p \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

donde  $\mathbf{C}_p$  incluye todos los tipos de parámetros y tiene forma de diagonal por bloques si los estimadores previos de los distintos tipos de parámetros no están correlacionados.

En la práctica, no se maximiza (3.8) directamente, sino que se minimiza:

$$S = -2 \ln(L(\mathbf{w}/\mathbf{z}^*)) \quad (3.10)$$

Sustituyendo (3.7) y (3.9) en (3.8) se obtiene:

$$S = \frac{J_h}{\sigma_h^2} + \frac{J_c}{\sigma_c^2} + \sum_i \frac{J_i}{\sigma_i^2} + \ln|\mathbf{V}_c| + \sum_i \ln|\mathbf{V}_i| + n_c \ln \sigma_c^2 + n_h \ln \sigma_h^2 + \sum_i n_i \ln \sigma_i^2 + N \ln 2\pi \quad (3.11)$$



siendo  $|V_h|$  el determinante de la matriz respectiva, y donde

$$J_h = (h - h^*)^t V_h^{-1} (h - h^*) \quad (3.12)$$

$$J_c = (c - c^*)^t V_c^{-1} (c - c^*) \quad (3.13)$$

$$J_i = (p_i - p_i^*)^t V_i^{-1} (p_i - p_i^*) \quad (3.14)$$

donde  $h_m^*$  y  $c_m^*$  son los vectores de niveles y concentraciones medidos, respectivamente. Por último,  $p_i^*$  es el vector de estimaciones previas de los parámetros del tipo  $i$ . Si, además, la estructura de errores se supone conocida, minimizar (3.11) es equivalente a minimizar:

$$J = J_h + \lambda_c \cdot J_c + \sum_i \lambda_i \cdot J_i \quad (3.15)$$

$$\lambda_i = \frac{\sigma_h^2}{\sigma_i^2} \quad \lambda_c = \frac{\sigma_h^2}{\sigma_c^2}$$

El programa TRANSIN minimiza la función objetivo  $J$  definida por la ecuación (3.15) con respecto a los parámetros del modelo ( $K$ ,  $S_s$ ,  $q$ ,  $\alpha$ , etc.). Como algoritmo de minimización TRANSIN utiliza el Método de Marquardt, que es un algoritmo iterativo de resolución de problemas no lineales de estimación de parámetros por mínimos cuadrados (Marquardt, 1963).

Las principales dificultades que el Problema Inverso puede presentar se refieren a la no unicidad de la solución (puede resolverse mejorando la información sobre los parámetros), a la inestabilidad (pequeñas variaciones en los datos de partida provocan grandes cambios en los resultados estimados), a las dificultades de convergencia (necesidad de mejorar los datos de medidas y de información de parámetros), etc.

### 3.3. Código Numérico TRANSIN

El Código Numérico TRANSIN posee las siguientes características:



- (a) Resuelve las ecuaciones de flujo de aguas subterráneas y de transporte de solutos por medio del Método de los Elementos Finitos.
- (b) Permite adaptar la discretización espacial a contornos geométricos complicados (mallas no estructuradas) y trabaja en varias dimensiones. Admite diferentes tipos de elementos 1D, 2D Y 3D (eso facilita la simulación de flujos preferentes).
- (c) Tiene implementado un potente y robusto algoritmo para la aplicación del Problema Inverso (Medina and Carrera, 1996).
- (d) Es relativamente sencillo incorporar información en detalle por sectores – es decir, pasar de un modelo a escala regional a local y viceversa.
- (e) Es un programa con resultados excelentes y comprobados en la simulación de flujos preferentes, esto es fracturas (Carrera et al., 1995) en los típicos problemas de simulación de medios fracturados de baja permeabilidad estudiados en el campo de los repositorios de residuos nucleares.

Este código numérico puede resolver la ecuación de flujo bajo un amplio espectro de situaciones:

- En régimen saturado y/o no saturado (o mezcla de ambos en espacio y tiempo)
- Con hipótesis de sistema confinado o no confinado
- Dependencia no lineal de algunos parámetros respecto del nivel o la presión (succión) del agua a través de algunas funciones genéricas que describen la mayoría de las situaciones reales.
- El régimen puede ser estacionario y/o transitorio.
- Las condiciones de contorno pueden variar en espacio y/o tiempo. Se contemplan las siguientes: caudal prescrito, nivel prescrito y goteo.
- Las condiciones iniciales pueden ser arbitrarias dadas o tomarse como la solución en régimen permanente.

Los parámetros de flujo que se pueden estimar son: transmisividades o conductividades, almacenamiento, recarga, niveles y caudales prescritos en el contorno y coeficientes de goteo.



### **3.4. Programa VISUALTRANSIN**

El código numérico TRANSIN dispone de la versión amigable VISUALTRANSIN (VT). En esta herramienta se pueden diferenciar dos partes. La primera, que actúa de interfaz con el usuario, donde se integran todos los elementos necesarios para una buena interpretación, facilitando la organización de la información como el contraste entre diversas hipótesis de trabajo. El programa permite trabajar con material de SIG, pudiendo importar datos en formato Shape file. La segunda parte, el bloque de cálculo, es el TRANSIN propiamente dicho, donde se puede hacer un análisis completo de los resultados. Esta interfaz gráfica resultante tiene una dificultad de empleo muy inferior a la complejidad inherente al problema que se desea resolver.



#### 4. MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual representa la hipótesis de funcionamiento del sistema, y por ende es de carácter cualitativo; se construye integrando la información geológica, estructural, geofísica, hidrológica/hidrogeológica, hidroquímica e isotópica. En el caso del SAG, además de la información antecedente, durante la ejecución del proyecto se generó variada información de campo que por diferencias en el cronograma de trabajo no pudo ser interpretada e incorporada al modelo conceptual. Por ende el modelo conceptual disponible constituye una nueva y mejorada conceptualización del SAG respecto a las anteriores pero de ninguna manera su versión final. Aún presenta numerosas incertidumbres referidas a varios aspectos que podrán ir disipándose en el futuro a medida que se incluya la información faltante y se desarrollen nuevas investigaciones.

Si bien el LEBAC-UNESP tuvo a su cargo la elaboración del modelo conceptual (LEBAC, 2008), se mantuvieron numerosos intercambios técnicos a medida que se avanzaba en la modelación numérica de tal manera de encontrar una coherencia entre la estructura del modelo numérico y el conceptual. El análisis del modelo conceptual y su posterior validación fueron complementados con la revisión de documentación antecedente y de información generada en otros productos del proyecto SAG como así también en el proyecto SAG-PY. La mayoría de la documentación del proyecto HGTMR fue suministrada por el Dr. Veroslavsky; parte de la información preliminar de los proyectos de las Subregiones Norte y Sur así como de las Áreas Pilotos las proveyó la Empresa SNC-Lavalin; y la documentación referente a todo el proyecto SAG se obtuvo del sitio web de la Secretaría General ([www.sg-guarani.org](http://www.sg-guarani.org)).

Se presentan aquí los rasgos más sobresalientes del modelo conceptual sobre el cual se basa la modelación numérica más algunas interpretaciones del sistema de flujos. Más detalles del modelo conceptual pueden encontrarse en el informe respectivo (LEBAC, 2008).

El SAG se desarrolló dentro de una extensa cuenca sedimentaria, en un complejo contexto geotectónico. Dentro del proyecto se adoptó un criterio de separación operativa de las formaciones fundamentado en la estratigrafía, dejando fuera de la definición de SAG a ciertas unidades que tradicionalmente se asociaban al mismo. Bajo esta definición el SAG apoya sobre una superficie erosiva basal que



estaría presente en toda la cuenca de Paraná, poniendo al SAG en contacto con unidades poco permeables (arcillosas) en el norte, más permeables en centro (limo-arcillosas) y permeables (limo-arenosas) en el sector sur. Esto sin duda tiene implicancias en el sistema de flujos verticales que no están siendo tenidos en cuenta y deberían abordarse en nuevas interpretaciones del modelo conceptual.

La cubierta basáltica del SAG le confiere características de confinamiento y/o surgencia en aproximadamente un 90 % de su superficie, siendo el 10 % restante identificada como de afloramiento sujeta a recarga directa por precipitación y marcados intercambios con el sistema de agua superficial. Si bien se desconoce el grado de fracturamiento y/o alteración de los basaltos, es poco probable asumir que una cubierta de cerca de un millón de kilómetros cuadrados sea completamente impermeable. Numerosos antecedentes a nivel mundial referidos a este tipo de unidades (Custodio y Llamas, 1976; El-Kadi and Moncur, 1996) evidencian la posibilidad de una conexión hidráulica con las unidades infrayacentes. Es posible que esta conexión se produzca en zonas alteradas y/o meteorizadas de menores espesores a través de unas pocas fracturas de tamaño finito, como por un conjunto de pocas fracturas muy conductoras ubicadas dentro de una matriz de baja permeabilidad de espesores considerables. Al igual que con los sedimentos pre-SAG, esta conexión podría afectar los flujos posibilitando tanto recarga desde los basaltos (flujos descendentes) como vías preferentes de flujo ascendente.

De acuerdo a la interpretación de LEBAC (2008), los mayores espesores del SAG (Figura 4.1) se encontrarían en territorio brasileiro al oeste de la denominada "calha" central (aprox. 600 m), mientras que los mínimos se encontrarían a lo largo de un eje paralelo a la dorsal Asunción/Río Grande hacia el norte. El mapa permite también reconocer varios depocentros. En consonancia con las profundidades a las que se encuentra el SAG, existen marcados gradientes de temperatura (Figura 4.2), presentando los mayores valores en un eje de dirección noreste-suroeste localizado en territorio brasileiro. Este mapa resulta esencial para la corrección de los valores de conductividad hidráulica utilizados en el modelo numérico (Custodio y Llamas, 1979).

El mapa de niveles piezométricos (Figura 4.3) fue construido mayormente con datos de niveles medidos en el momento de la construcción de los pozos, en consecuencia abarcan una ventana temporal de 20-30 años a partir del año 1970. La superficie piezométrica resultante no sería representativa de niveles actuales, en



particular en zonas de grandes explotaciones. La dirección predominante de flujo a nivel regional es de norte y este hacia el centro de la cuenca, influenciada por las características tectónicas/estructurales de la cuenca sedimentaria.

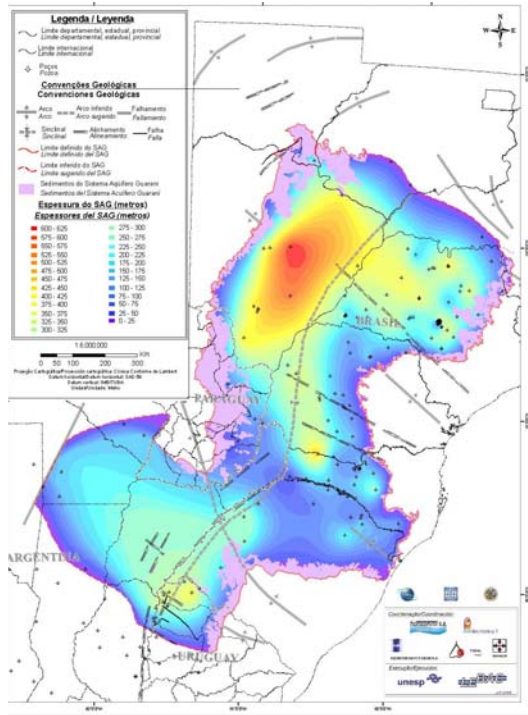


Figura 4.1. Mapa de Isópacas (LEBAC, 2008).

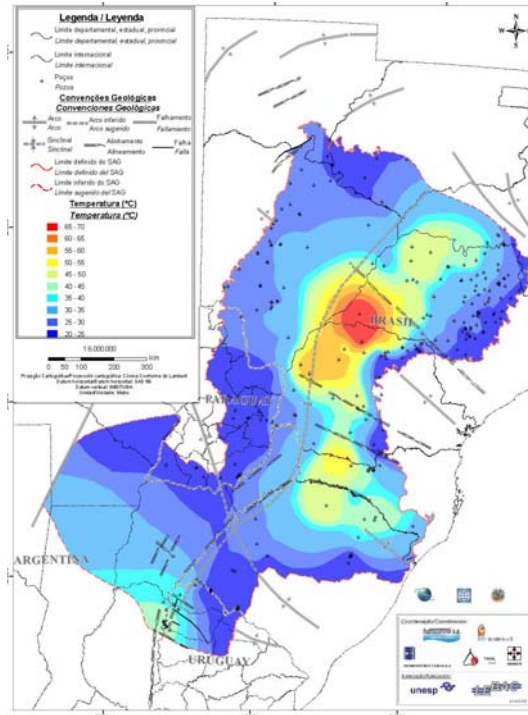


Figura 4.2. Mapa de Isotermas (LEBAC, 2008).

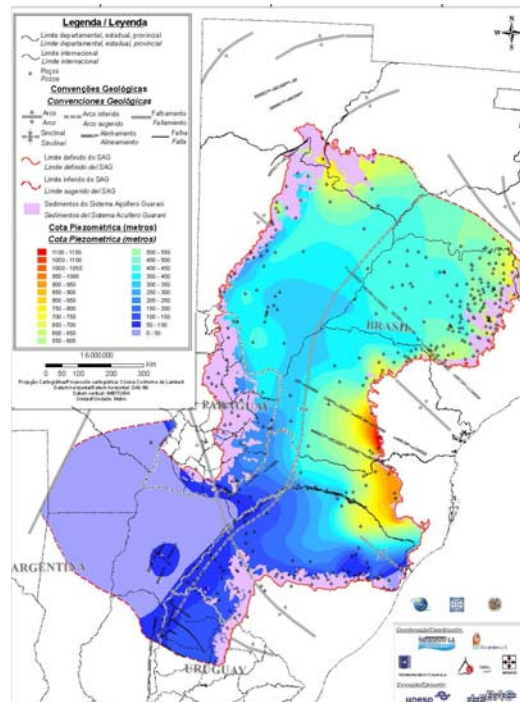


Figura 4.3. Mapa potenciométrico (LEBAC 2008).





Una de las mayores incertidumbres que aún persisten en el modelo conceptual es la zona de descarga del sistema regional. Si bien se identifican sistemas locales de recarga/descarga en las zonas de afloramiento en la periferia oeste del sistema, las hipótesis acerca de las posibles alternativas de descarga son variadas, por ejemplo tramos de los ríos Uruguay y Paraná, formaciones infrayacentes, zonas de fracturamiento de los basaltos, etc. Es necesario abordar este aspecto en futuras investigaciones para incrementar la confiabilidad del modelo conceptual y por ende la del modelo numérico desarrollado a posteriori para su validación.

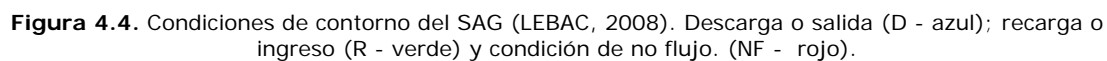
#### **4.1. Comportamiento del SAG en los contornos**

EL LEBAC propuso como condiciones de contorno del SAG las que se presentan en la Figura 4.4, donde se pueden observar las zonas de flujo nulo, las de descarga o salida y las de recarga o ingreso.

La recarga en general ocurre por áreas de afloramiento del SAG y ya tiene incorporada la componente de evapotranspiración. Potencialmente, la recarga que no es interceptada ni por los ríos ni por el bombeo podría convertirse en recarga profunda. Existen dos regiones internas de recarga, una la meseta de Mercedes en Argentina y las ventanas en el sector oeste del territorio de Brasil, donde se asume que el SAG no está confinado por la Formación Serra Geral y que directamente está conectado a las formaciones terciarias que permitirían la infiltración profunda hacia el SAG. El modelo conceptual actual no contempla recarga indirecta al SAG provenientes de los basaltos.

Las descargas del sector oeste tienen la particularidad que se comportan como zonas de recarga local por excedente de la precipitación y como zonas de descarga a través del contorno de flujos tanto locales como regionales. En este sector contribuyen fundamentalmente a la descarga local el sistema de ríos que drenan al oeste. Esta situación, aparentemente en menor proporción, también se observa en el sector sur a lo largo de la frontera en el Estado de Santa Catalina.

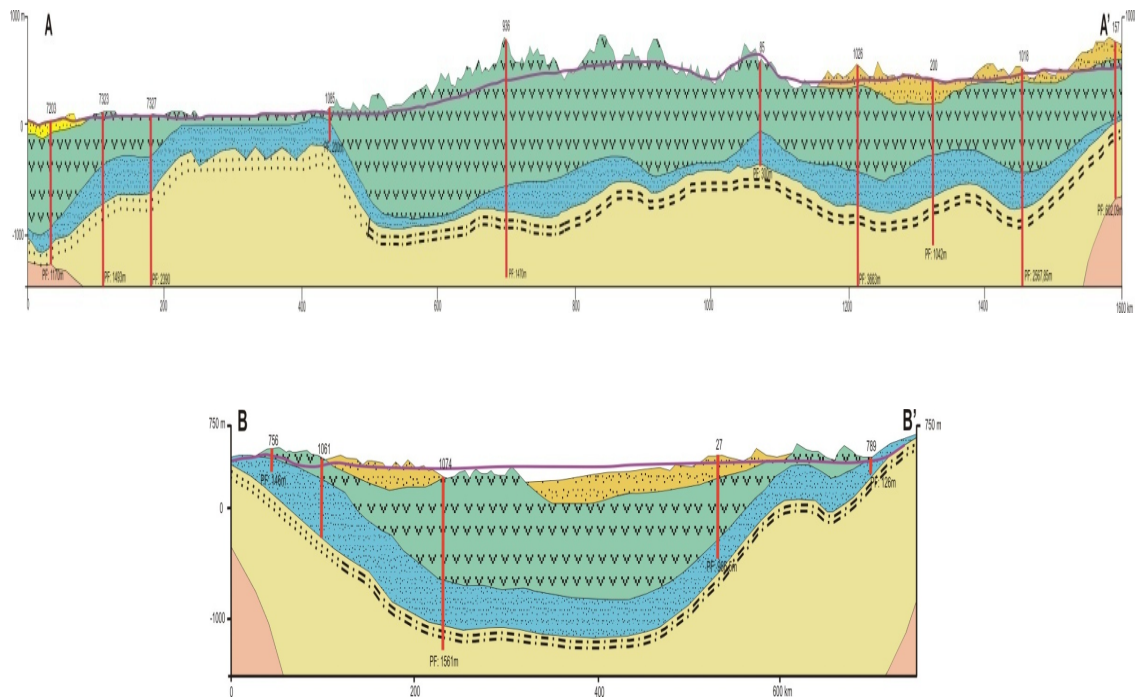




Tal como se expresó anteriormente, dentro del proyecto se adoptó un criterio de separación operativa de las formaciones, dejando fuera de la definición de SAG a ciertas unidades que tradicionalmente se asociaban al mismo en trabajos previos. Otra de las hipótesis básicas del modelo conceptual es la continuidad



geológica e hidráulica del SAG, tal como se aprecia en los perfiles de la Figura 4.5. Sin embargo otros autores (Ferreira, 1982; Campos, 2000; Rosa Filho et al., 2003; Machado y Faccini et al., 2003; Soares et al., 2007; Soares, 2008) postulan la presencia de una compartimentación tectónica definida por la presencia de los lineamientos más expresivos. Las discontinuidades geológicas no necesariamente implican discontinuidades hidráulicas dado que las formaciones infra/suprayacentes pueden ser buenas conductoras de agua en diferentes sectores. Por ejemplo se han reportado permeabilidades de la formación Piramboia del orden de 0.86 m/d, similar a las areniscas de origen fluvial (Soares, 2008).



**Figura 4.5.** Perfiles geológicos longitudinal (norte- sur) y transversal (oeste-este en el sector del Estado de São Paulo), tomados de LEBAC (2008). En la Figura 4.4 se muestra la ubicación de ambos perfiles.



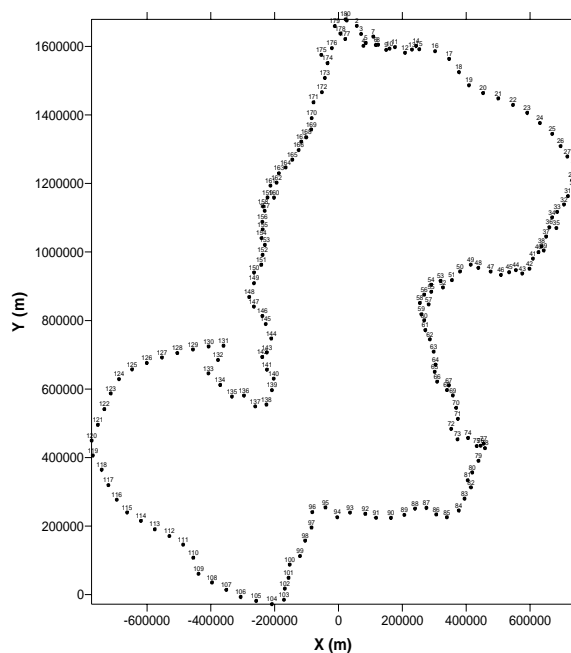
## 5. ESTRUCTURA DEL MODELO

Se denomina estructura del modelo al conjunto de parámetros espaciales y temporales que, conjuntamente con el dominio de modelación y las condiciones de contorno, representan numéricamente los procesos físicos y las características del sistema definidos en el modelo conceptual de funcionamiento.

En este capítulo se describe el dominio de modelación y las zonificaciones de la conductividad hidráulica, recargas, explotación, ríos y condiciones en los bordes. Finalmente se presentan los datos empleados en la calibración.

### 5.1. Dominio de modelación

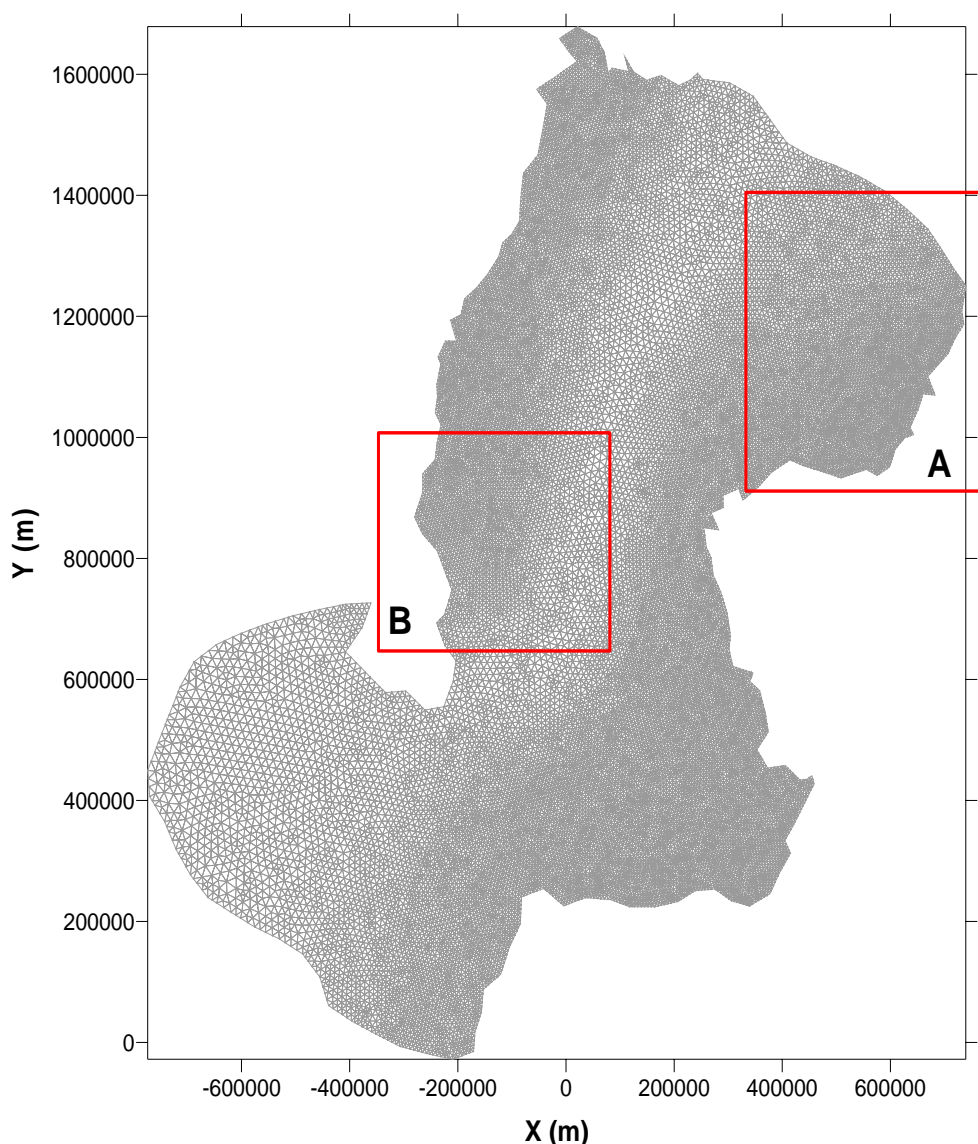
La Figura 5.1 muestra los puntos digitalizados sobre el límite del SAG que fueron utilizados para la generación de la malla de elementos finitos. Tal como se explica en el Anexo I, se utilizó un sistema de proyección de coordenadas Cónica de Lambert modificado a los fines de la modelación, denominado Lambert\_SAG4. Las coordenadas de todas las figuras de este informe así como también las determinaciones de áreas/longitudes están referidas a dicho sistema. El área modelada cubre 1.200.098 km<sup>2</sup>.



**Figura 5.1.** Representación discreta del dominio de modelación.

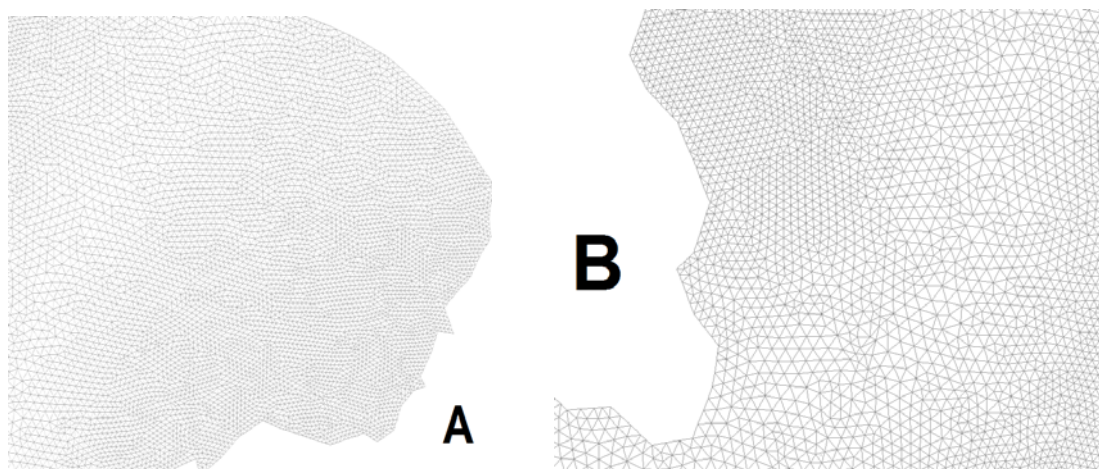


El dominio de modelación fue discretizado por un conjunto de 46862 elementos triangulares y 23890 nudos (Figura 5.2). La malla bidimensional presenta un mayor refinamiento en las áreas de elevados gradientes hidráulicos (generalmente en las zonas de afloramiento del SAG, Figura 5.3) con un promedio de 25 km<sup>2</sup> por elemento. En la zona central del dominio de estudio, coincidentemente con la traza del río Paraná, los elementos tienen los tamaños mayores. En cuanto a la discretización vertical sólo se modeló el llamado SAG operativo.



**Figura 5.2.** Malla de elementos finitos. Localización de las zonas A y B de mayor detalle.





**Figura 5.3.** Detalle de la malla de elementos finitos en las zonas A y B.

## 5.2. Zonas de conductividad

Si bien la ecuación de flujo resuelta está escrita en función de la transmisividad, se optó por zonificar el parámetro conductividad hidráulica  $K$  para que posteriormente el programa calcule transmisividades combinando la zonificación de  $K$  y el mapa de espesores variable para cada elemento.

La información antecedente respecto a valores de conductividad hidráulica es muy dispersa no existiendo un mapa de conductividades para todo el SAG. Los ensayos de bombeo disponibles y la bibliografía referente al tipo de sedimentos que lo componen brindan un límite máximo aproximado de 1-2 m/d (Freeze & Cherry, 1979) en tanto que en territorio paraguayo se reportaron valores entre 1,6 – 3,8 m/d (SAP-PY, 2007). En Uruguay se encuentran conductividades hidráulicas del mismo orden, con un rango entre 0,12 y 5,76 m/d, y un promedio de 1,5 m/d (Gómez, 2007).

Los valores de conductividad hidráulica fueron corregidos por la temperatura para cada elemento de la malla. Para ello se empleó la fórmula de Schneebeli (1966), extraída de Custodio y Llamas (1979), que dice:

$$k(\theta) \approx k(20^{\circ}\text{C}) \frac{\theta + 20}{40} \quad (5.1)$$



siendo  $\theta$  la temperatura en °C. La temperatura se calculó a partir del mapa de isotermas provisto por el LEBAC.

Para esta etapa del proyecto no se pudo disponer de suficiente información para definir una zonificación de conductividad con criterios adecuados, por ello se han planteado diferentes hipótesis (Figura 5.4):

- Zonificación 1: conductividad uniforme.
- Zonificación 2: basada en la zonificación de conductividad del premodelo de Vives et al. (2001). Nueve zonas de conductividad.
- Zonificación 3: basada en la piezometría definida por el LEBAC y la zonificación del premodelo (Zonificación 2). Diecinueve zonas de conductividad.
- Zonificación 4: basada en la piezometría definida por el LEBAC, esto es analizando cambios de gradientes hidráulicos. Treinta y una zonas de conductividad.
- Zonificación 5: basada en los espesores del SAG operativo. Diecisiete zonas de conductividad.
- Zonificación 6: basada en los espesores del SAG operativo (zonificación 5) con estructuras seleccionadas.

En las zonificaciones 2 a 5 la presencia de estructuras que controlarían el flujo fue tomada en cuenta sólo en forma indirecta mediante las características mencionadas.

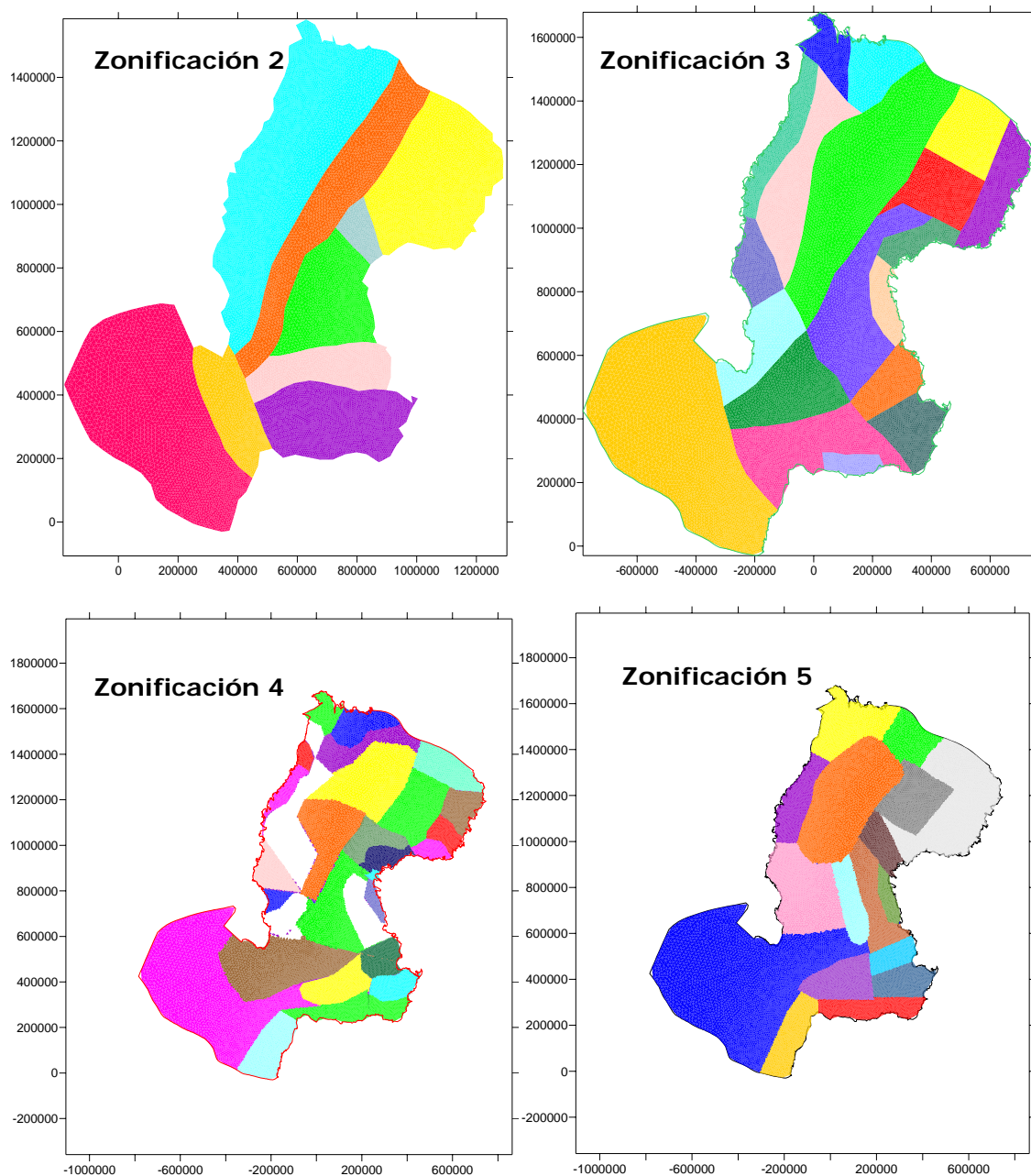
### 5.3. Zonas de recarga

Se asumió que la recarga areal al SAG operativo sólo se produce en forma directa sobre la zona aflorante (Figura 5.5), sin sustraer áreas urbanas impermeabilizadas que puedan existir en dichas zonas.

La tasa de recarga sobre las areniscas se definió como un porcentaje fijo de la precipitación media anual, asumiendo un gradiente de precipitación media anual escalonado en dirección norte sur desde 2000 mm en el norte a 1600 mm en la zona sur. El porcentaje fue variando en los distintos modelos ensayados en un



rango entre el 1 al 10 % de la precipitación anual, de acuerdo a la bibliografía consultada.



**Figura 5.4.** Zonificaciones de conductividad hidráulica.

Las posibles pérdidas por evapotranspiración de agua subterránea a partir de las areniscas no fueron explícitamente representadas.

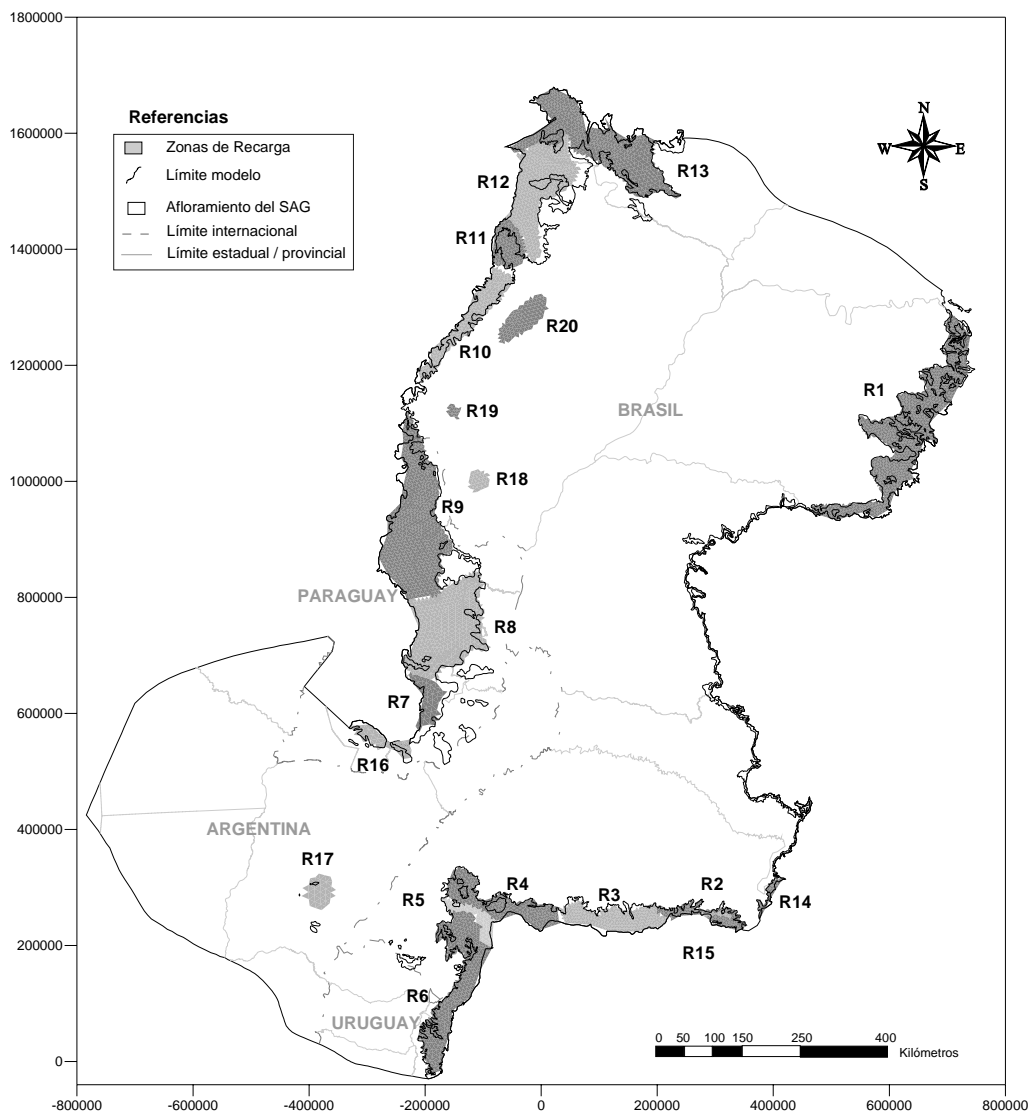


Figura 5.5. Zonificación de la recarga.

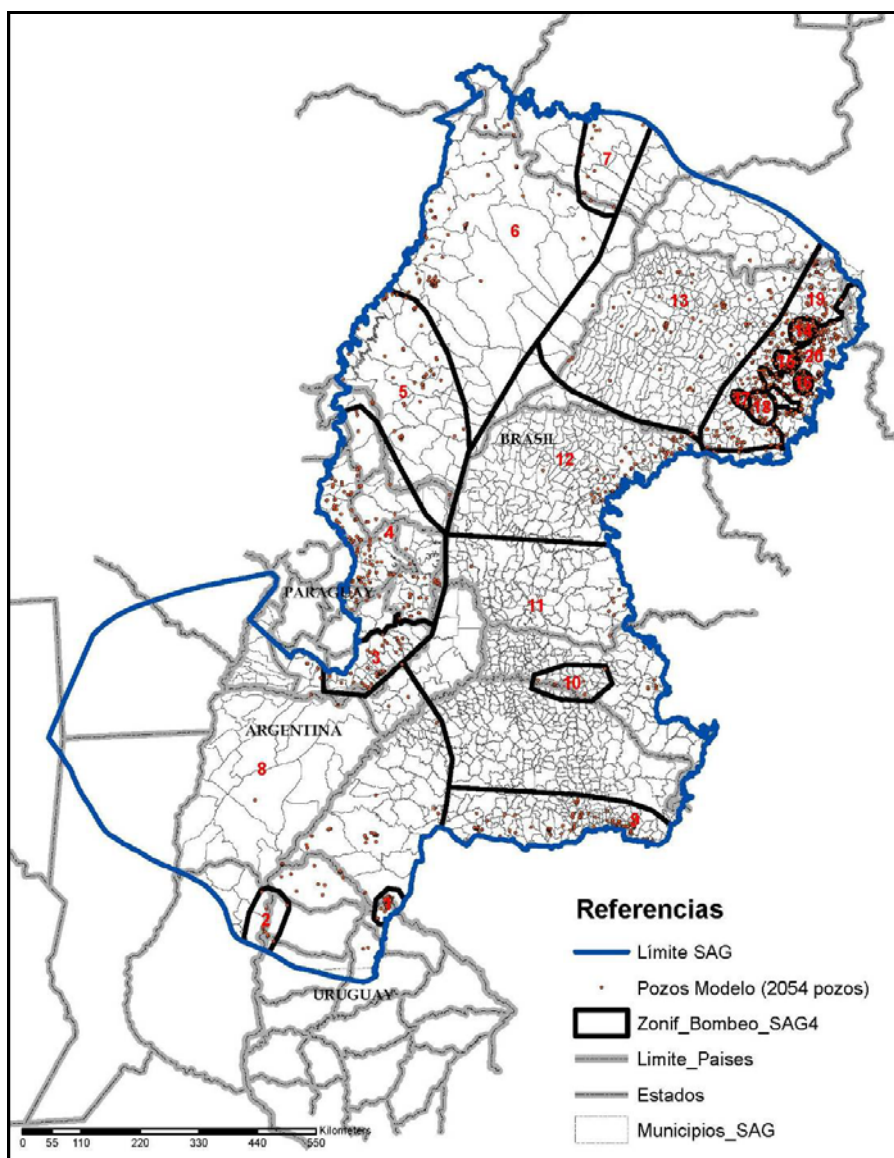
## 5.4. Zonas de bombeo

El volumen explotado actualmente y su distribución geográfica constituyen componentes fundamentales del modelo numérico. Los valores volumétricos encontrados brindan la mejor determinación posible dada la información hoy disponible, y pueden tanto subestimar (no todos los pozos en funcionamiento están catastrados, etc.) como sobreestimar la explotación (algunos de los pozos catastrados pueden no estar operativos o funcionar con caudales menores a los consignados al momento de la construcción del pozo).

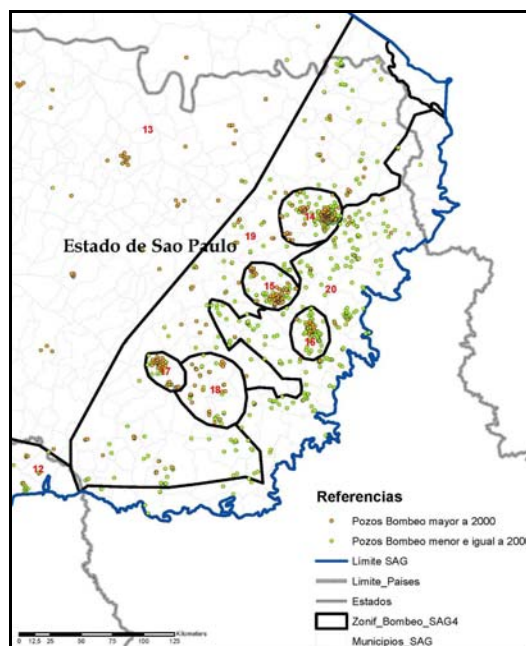




Tal como se explica en detalle en el Anexo II, se recurrió a la Base de Datos del proyecto y a fuentes de información adicional para chequeo de la información. Se definieron 20 zonas de bombeo para el modelo según el criterio de explotación y de ubicación geográfica. En la Tabla II.3 (Anexo II) se presentan los volúmenes diarios y el número de pozos para cada zona. Las zonas pueden observarse en la Figura 5.6 mientras que en la Figura 5.7 se presenta un detalle de la zonificación en el Estado de São Paulo, donde se encuentran los municipios Ribeirão Preto, Sertãozinho, São Carlos, Bauru, Descalvado y Araraquara con las mayores concentraciones de pozos.



**Figura 5.6.** Ubicación de pozos de explotación y zonificación de los pozos utilizada en el modelo.



**Figura 5.7.** Detalle de la zonificación en zona de mayor explotación.

Para el cómputo del volumen de extracción anualizado se supuso que los pozos operan 18 horas diarias. El volumen diario total resultó  $2847013,47 \text{ m}^3$ , que corresponde a  $1040 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

## 5.5. Tratamiento de la interacción río-acuífero

El SAG está ubicado debajo de la vasta cuenca del Plata, caracterizada por una densa y jerarquizada red de drenaje que desemboca en los principales ríos de la región: Paraná, Paraguay y Uruguay. En el borde occidental del acuífero, en territorio brasileño y paraguayo, numerosos cursos de agua drenan hacia la cuenca del Paraguay mientras que en el resto del área los cursos fluyen hacia el Uruguay y el Paraná. Debido a su confinamiento en aproximadamente 90 % de su área, la interacción del agua subterránea del SAG y el agua del sistema superficial ocurriría en zonas de contacto directo entre ellas, esto es en zonas de afloramiento de las areniscas. Se desconoce si no existen zonas que interaccionen por alguna estructura que conecte preferentemente estos dos cuerpos de agua, hipótesis que es recomendable estudiar en el futuro.

Sin embargo, uno de los aspectos trascendentales para la caracterización del acuífero que presenta mayor incertidumbre son las descargas naturales del



sistema, sin cuyo conocimiento no es posible validar un modelo conceptual ni cuantificar el balance hídrico con el necesario grado de consistencia. En particular, ello se ha puesto de relieve en el modelo regional. En principio se supone que una parte de la descarga se produciría a través de ciertos tramos de los ríos Paraná y Uruguay, así como de tributarios de estos, aún en zonas de confinamiento del acuífero donde es factible la conexión hidráulica a través de basaltos alterados y/o fracturados de menor espesor, que estarían ubicados en territorios de Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina.

El tratamiento numérico de la interacción acuífero-río se realiza mediante una condición de tipo mixta o goteo, cuya expresión matemática es

$$Q = \frac{AK}{L}(h - H_{ext}) = \alpha(h - H_{ext}) \quad (5.2)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de goteo,  $h$  la altura piezométrica y  $H_{ext}$  es un nivel externo de referencia. Tanto el coeficiente de goteo como el nivel externo pueden zonificarse para adaptarse a las condiciones de río.

En la Tabla 5.1 y Figura 5.8 se presentan todos los tramos de ríos simulados, a los cuales se asocia una zona de coeficiente de goteo. Para definir el valor de este parámetro, que se impone en los nudos, se tiene presente la longitud entre nudos que componen la traza del río y se adopta como coeficiente de goteo el valor del ancho del mismo en ese tramo por la conductividad del material del lecho. En general, se adoptó un valor entre 1 a 10 m<sup>2</sup>/d y para los ríos Paraná y Uruguay se impusieron valores entre 50 y 20 m<sup>2</sup>/d, respectivamente.

**Tabla 5.1.** Ríos simulados con su número de zona.

Zona	Nombre del río / borde	Zona	Nombre del río / borde	Zona	Nombre del río / borde	Zona	Nombre del río / borde
1	Claro	9	Coxim	17	Yguazú	25	Jurumirim
2	Verde	10	Aquidauana	18	Capiibary I	26	Tieté
3	Araguaia	11	Ypané	19	Capiibary II	27	Jacaré Pepina
4	Itiquira	12	Guazú	20	Paraná	28	Moji Guazú
5	Correntes	13	Aguarey Guazú	21	Uruguay	29	Pardo
6	Tacuari	14	Jejuí Guazú	22	Tacuarembó Chico		
7	Ariranha	15	Curuguaty Correntes	23	Tacuarembó		
8	Jaurú	16	Tebicuary	24	Ibicui		

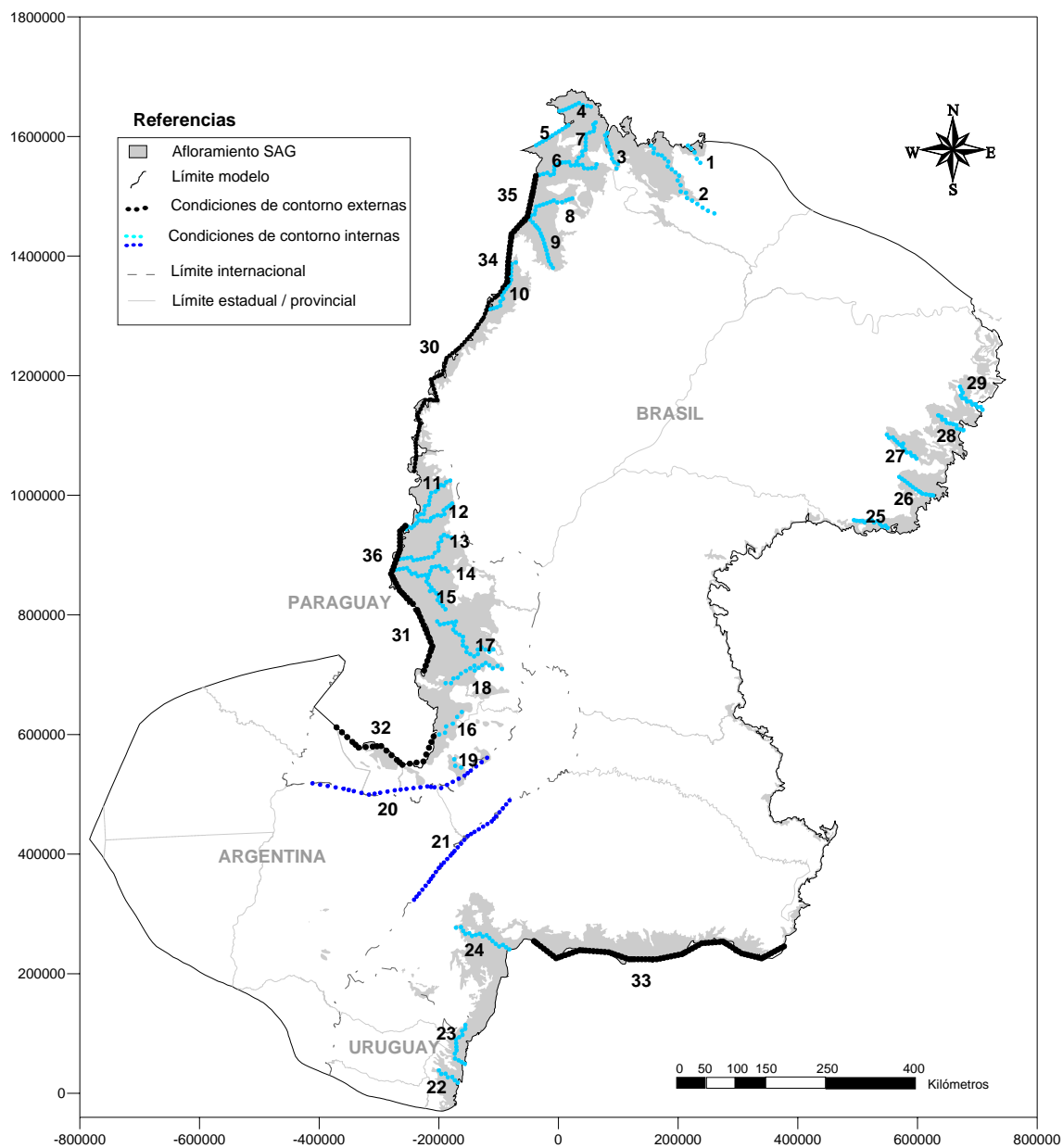


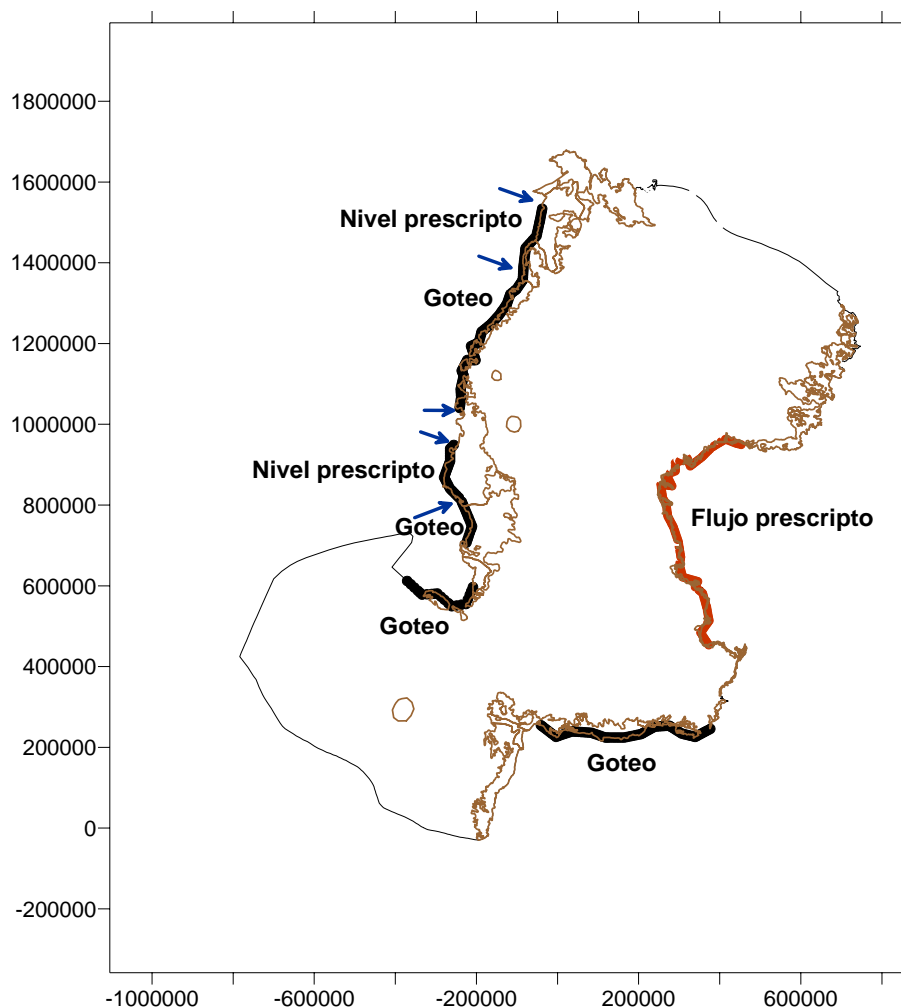
Figura 5.8. Ríos simulados explícitamente.

Dado que no se dispone de información hidrométrica suficiente, es decir caudal y/o tirante, ni de las características geométricas de la mayoría de los ríos simulados, el coeficiente de goteo es un parámetro de calibración del modelo. En tanto que el nivel externo  $H_{ext}$  puede definirse a partir de la cota topográfica interpolada del modelo digital del terreno (MDT) a lo largo de la traza de los ríos, o como la altura piezométrica en la vecindad de la traza. Con excepción de los ríos Aquidaguana y Uruguay, en todos los demás el  $H_{ext}$  se interpoló del MDT.



## 5.6. Condiciones de contorno en el borde

Las condiciones de contorno en el borde del modelo representan la conexión entre el dominio de modelación y su entorno exterior. De acuerdo al modelo conceptual (LEBAC, 2008), el límite del SAG presenta una combinación de zonas de descarga o recarga de agua como de flujo nulo (Figura 4.4). La Figura 5.9 muestra las condiciones implementadas en el borde del modelo, resultantes del análisis de la propuesta del modelo conceptual, la piezometría y la calibración. La transición de un tipo de condición de borde a otra está indicada por flechas azules. Para las condiciones de goteo se definieron dos parámetros, coeficiente de goteo y nivel externo, que en este caso se interpoló de la piezometría. En la Tabla 5.2 se presenta la zonificación de los niveles prescriptos y de los goteos con la numeración correspondiente.



**Figura 5.9.** Condiciones de borde externa del modelo numérico.

**Tabla 5.2.** Condiciones de contorno en el borde con su número de zona.

Zona	Nombre del contorno	Tipo de condición de contorno
30	Lateral Oeste Medio	Goteo
31	Lateral Oeste Sur	Goteo
32	Lateral Norte Paraná	Goteo
33	Lateral Sur	Goteo
34	Lateral Oeste Tacaurí	Nivel prescripto
35	Lateral Oeste Coxim	Nivel prescripto
36	Lateral Oeste	Nivel prescripto

## 5.7. Niveles observados o medidos

En la resolución del problema de flujo subterráneo, los niveles piezométricos observados o medidos constituyen la pieza de información más importante para la estimación de parámetros debido a que son utilizados en el cómputo de la función objetivo al resolver el problema inverso.

LEBAC utilizó 371 puntos medidos para la construcción de las curvas piezométricas. En el Anexo III se presenta un análisis de consistencia de los mismos para identificar la presencia de valores anómalos que puedan afectar la calibración.

En un trabajo conjunto con el Dr. Didier Gatsman, se seleccionaron 114 niveles observados del universo inicial de 371 de tal manera de contar con una distribución homogénea de medidas dado que en algunas zonas existe una concentración elevada de pozos mientras que en otras la densidad es pequeña (Figura 5.10). Cabe señalar que el resto de los puntos de observación no se descartan del proceso de calibración sino que intervienen con un menor peso debido a que son considerados *a priori* menos certeros.

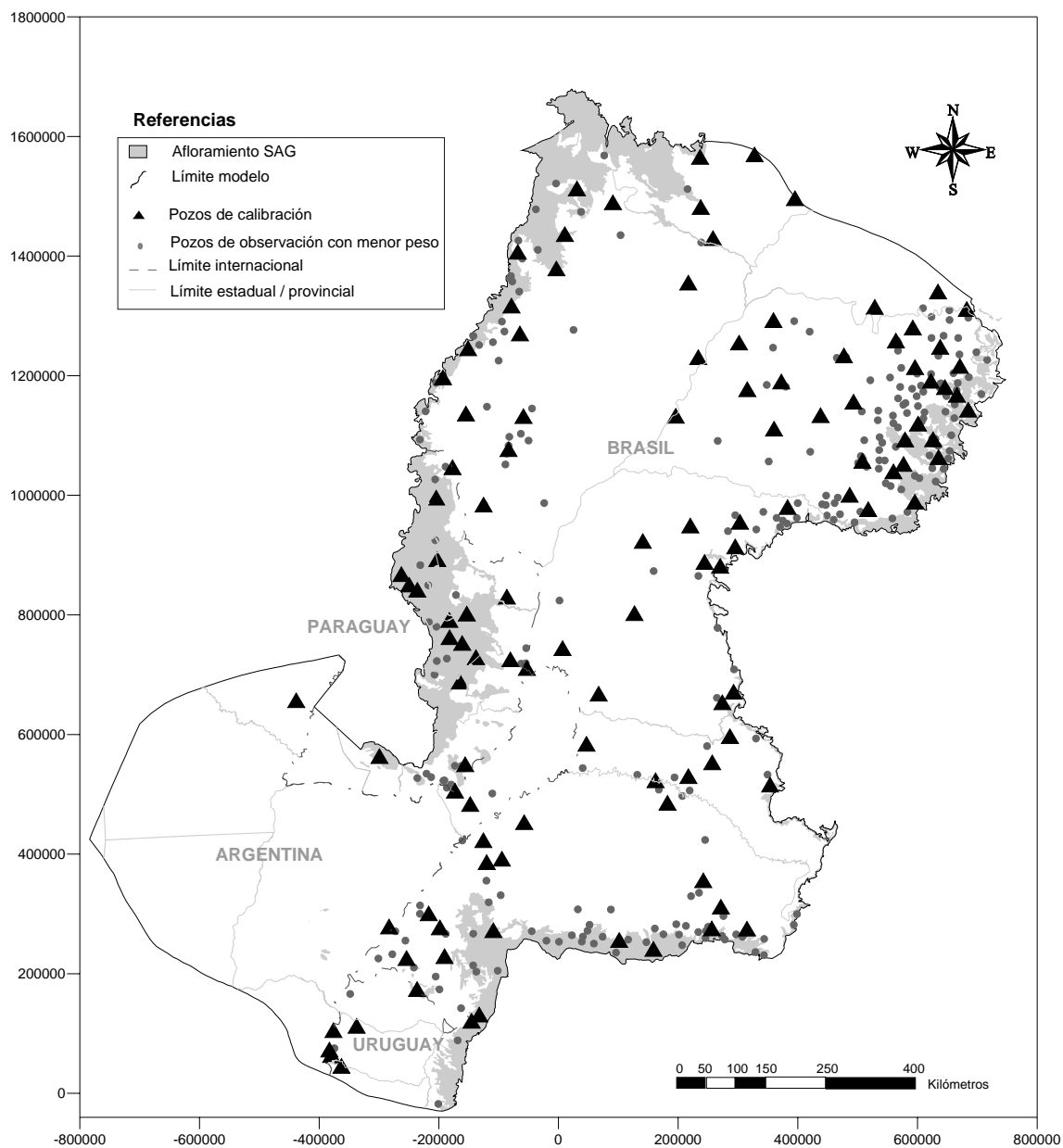


Figura 5.10. Puntos de observación seleccionados para el proceso de calibración del modelo.





## 6. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

En este capítulo se presentan los diferentes escenarios simulados donde se varían las zonas de conductividad hidráulica y las tasas de recarga areal, generalmente calibrando automáticamente los parámetros de conductividad. La denominación de las zonificaciones de la conductividad hidráulica se corresponde con las definidas en el Capítulo 5. Los escenarios 1 a 7 que se describen a continuación fueron simulados en régimen estacionario, mientras que en el Escenario 8 se trabajó en régimen transitorio. Los resultados son discutidos en este capítulo mientras que las piezometrías, los parámetros calibrados, el análisis de errores y los balances de masa calculados son presentados en el Anexo IV.

### 6.1. Escenario 1: Conductividad uniforme

Esta simulación tuvo como objetivo explorar la respuesta del modelo, esto es su sensibilidad, a la tasa de recarga tanto en modo simulación (K fija) como en modo calibración (K calculada), asumiendo una única zona de conductividad hidráulica o K uniforme para todo el dominio de modelación. Como resultado se obtuvo la tasa de recarga que finalmente se empleó en las simulaciones subsiguientes.

Se definieron las siguientes tasas de recarga como porcentaje de la precipitación anual de 10 %; 5 %; 1%; y 5% en el Este, 1% en el Oeste. Estos porcentajes afectaron tanto a la recarga areal como al flujo prescrito impuesto a lo largo de 12,5 km en el borde este (ver Figura 5.9). Se adoptó una variación de la precipitación anual de sur a norte del dominio en un rango entre 1600 a 2000 mm.

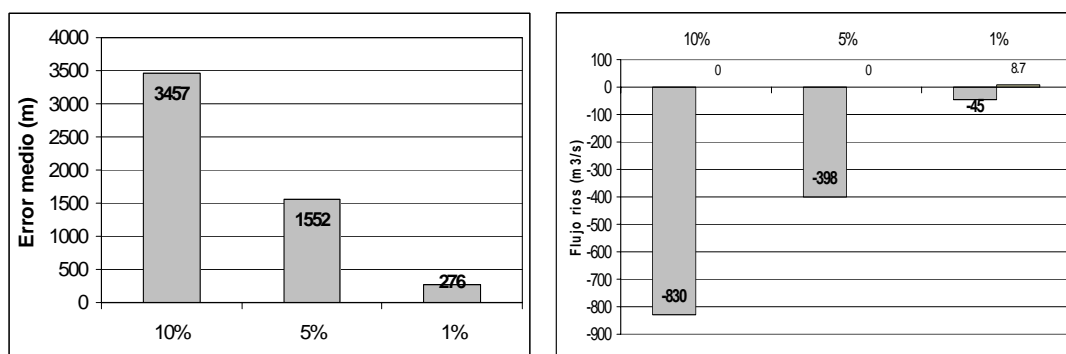
En el modo simulación se utilizó  $K = 1$  m/d, analizándose la variación del error medio de la simulación y el flujo a través de la interacción acuífero/río, llamado flujo ríos de aquí en adelante (Figura 6.1). Los flujos positivos indican entradas al acuífero y los flujos negativos salidas. Una reducción de la tasa de recarga de 10 % a 1% produce una marcada reducción del error medio, definido como

$$EM = \sum_{N_{obs}} |nivel\ medido - nivel\ calculado| / N_{obs} \quad (6.1)$$



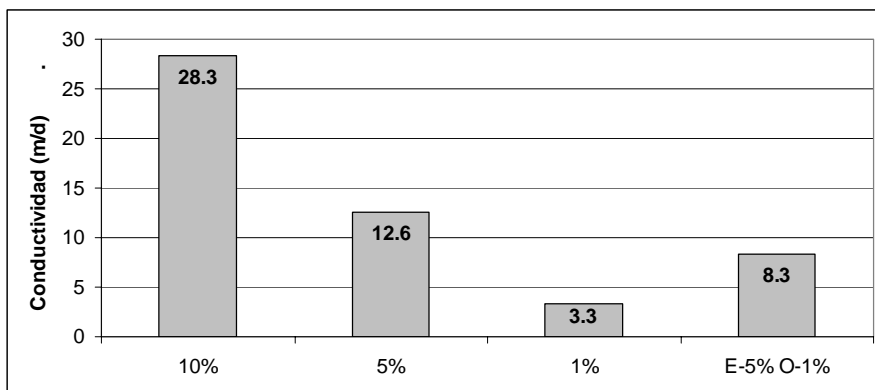


donde  $N_{obs}$  es el total de puntos de observación utilizados en la calibración. Los ríos drenan el acuífero, observándose una marcada disminución del flujo desde el acuífero hacia los ríos a medida que se reduce la recarga. Para el caso del 1% de tasa de recarga se origina un pequeño flujo desde los ríos hacia el acuífero (flujo positivo), debido a que la reducción de niveles piezométricos simulados produce en algunos sectores valores menores que el nivel prescripto en los ríos, se invierte el gradiente hidráulico y por ende se revierte la dirección de flujo.

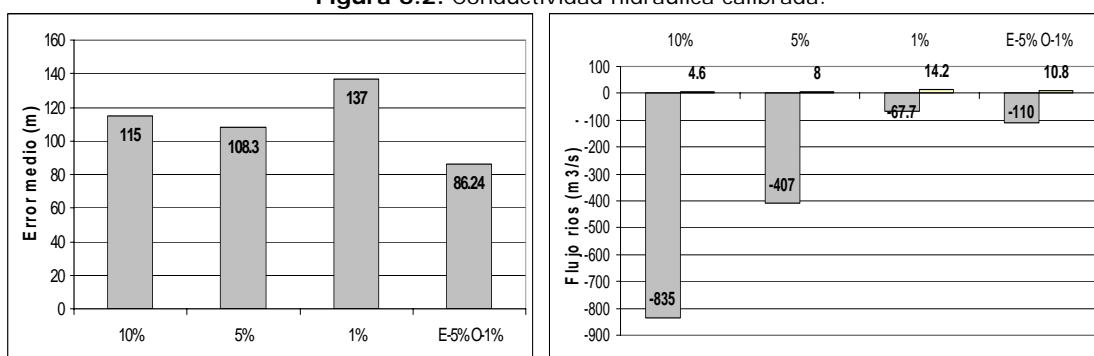


**Figura 6.1.** Error medio y flujo ríos para diferentes tasas de recarga  
Permeabilidad uniforme - Modo simulación. Escenario 1.

En el modo calibración, los resultados indican que para reducir los niveles piezométricos a valores razonables se necesita emplear conductividades más elevadas para valores mayores de recarga (Figura 6.2). Se debe tener presente que sólo se simula el SAG operativo sin interacción con otras unidades, y por ende es de esperar que las permeabilidades necesarias para "acomodar" el sistema de flujos resulten mayores a las esperables para areniscas. Se realizó una simulación adicional con recarga de un 5 % de la precipitación en el este y 1% en el oeste, en este caso se obtuvo un leve aumento de K calibrada pero una mejora en el error medio (Figura 6.3), que se redujo a 86,24 m para una conductividad calibrada de 8,3 m/d.



**Figura 6.2.** Conductividad hidráulica calibrada.



**Figura 6.3.** Error medio y flujo ríos para diferentes tasas de recarga  
Permeabilidad calibrada - Modo calibración.

Al igual que en el modo simulación, al calibrar las recargas de 10%, 5% y 1% se produce una disminución del flujo a los ríos y como era de esperar un aumento para la cuarta simulación. En todos los casos existe un flujo positivo de escasa magnitud en comparación con el aporte del acuífero a los ríos.

Finalmente, sobre la base del cuarto escenario, se calibraron las tasas de recarga de la zona R1 (ver Figura 5.5) y el flujo prescrito en el borde este (ver Figura 5.9 y Tabla IV.1). El error medio fue de 68.19 m y K calibrada 7,5 m/d. En dicha tabla se presentan las tasas de recarga para cada zona, tasas que se mantuvieron en todas las simulaciones posteriores. La Tabla IV.1 muestra todas las componentes del balance de masa. Las zonas de goteo pueden identificarse en la Figura 5.8 y las de bombeo (flujo prescrito) en las Figuras 5.6 y 5.7.

La Figura IV.1 presenta la piezometría calculada, se observan elevados gradientes a lo largo del borde este y algunos sistemas de flujo locales en el borde oeste. Se eligieron las curvas de 400 y 200 m como patrón de comparación en todas las simulaciones realizadas. La Figura IV.2 muestra la distribución geográfica de los errores (Error = nivel medido – nivel calculado), errores negativos indican



sobreestimación, errores positivos subestimación. En general los mayores errores ocurren en zonas cercanas a la periferia del modelo y zona central, con predominancia de sobre estimación (símbolos rojos), con concentración de errores negativos al sur del estado de Santa Catarina y negativos/positivos en el estado de San Pablo. Claramente se evidencia la necesidad de zonificar la conductividad para reproducir la piezometría observada.

El contraste entre niveles medidos y calculados (Figuras IV.4) indica que los errores positivos/negativos en los puntos de observación seleccionados están homogéneamente distribuidos, no existiendo una tendencia a la sobreestimación o subestimación. En la Figura IV.5, donde se incluyeron la totalidad de los puntos de observación disponibles, se observa el mismo comportamiento con una mayor dispersión de la nube.

## **6.2. Escenario 2: Zonificación 2 de la conductividad**

Esta zonificación sigue los patrones de la zonificación del premodelo (Vives et al., 2001), definiéndose nueve zonas de K (Figura IV.6). El rango de conductividades calculadas fue de 2,2 m/d a 17 m/d (Tabla IV.2). Esta calibración indicaría un sector en el centro este (zonas 4, 5, y 6) con conductividades más bajas, y un corredor central-oeste con conductividades más elevadas indicando la necesidad del modelo de transferir agua en dirección noreste-suroeste. Por ausencia/escasez tanto de información piezométrica como geológica/estratigráfica, la zona 9, en el sector argentino, es la que encierra la mayor incertidumbre, sin embargo la piezometría en el sector reproduce adecuadamente los patrones del modelo conceptual.

Las diferencias en la piezometría simulada (Figura IV.7) respecto al Escenario 1 se evidencian principalmente en un corrimiento de la equipotencial de 400 m hacia el noreste, en consonancia con el mapa potenciométrico conceptual. El resto del patrón de curvas piezométricas es similar al anterior, con un marcado control de los ríos en el NE y O y la presencia de esquemas locales de escurrimiento subterráneo en zonas de afloramiento.

La Figura IV.8 muestra la distribución geográfica de los errores. El error medio fue de 54,7 m. En general los mayores errores ocurren en la periferia del modelo. Mejora la calibración en el sureste pero persisten errores apreciables, de ambos signos, de más de 100 m, en el estado de São Paulo. Esto puede deberse a



una combinación de controles estructurales de diferente escala espacial y a las explotaciones. Diez pozos (de los 114) poseen errores superiores a  $\pm 100$  m, 57 puntos poseen errores superiores a  $\pm 30$  m. Por ende, en el 50 % de los puntos de calibración se obtuvieron errores por debajo de  $\pm 30$  m. La Figura IV.9 muestra la distribución geográfica de los errores considerando la totalidad de los pozos de observación.

El contraste entre niveles medidos y calculados (Figura IV.10) indica que los errores positivos/negativos en los puntos de observación seleccionados están homogéneamente distribuidos, no existiendo una tendencia a la sobreestimación o subestimación. En la Figura IV.11, donde se incluyeron la totalidad de los puntos de observación disponibles, se observa el mismo comportamiento con una mayor dispersión de la nube y una leve tendencia a la subestimación.

### 6.3. Escenario 3: Zonificación 3 de la conductividad

Se modificó la estrategia para la zonificación, utilizando en este caso el mapa potenciométrico trazado por LEBAC conjuntamente con la zonificación del premodelo, resultando en 19 zonas de conductividad (Figura IV.12). El rango de conductividades calculadas fue entre 3,1 m/d y 32,4 m/d (Tabla IV.4), con un valor anómalo fuera de ese rango en la zona 12. Esta zona de escasa extensión ubicada en la zona de descarga en Santa Catarina indicaría la necesidad de mejorar el análisis de la recarga local. Nuevamente la calibración arroja un sector de conductividades más bajas en el centro este y mayores valores en un corredor central (zona 3 y 16) para conducir el agua en sentido noreste-oeste-suroeste.

La nueva piezometría simulada se muestra en la Figura IV.13. Respecto al escenario 2, la curva de 400 m se corre hacia aguas abajo, al igual que la de 200 m. En el sector argentino la piezometría permanece casi inalterada reproduciendo los patrones del modelo conceptual. El resto de las curvas piezométricas son similares a las anteriores, con un marcado control de los ríos en el NE y O.

La Figura IV.14 muestra la distribución geográfica de los errores en los puntos elegidos para la calibración, resultando un error medio de 52,3 m. En general los mayores errores ocurren en la periferia del modelo y algunos en zona central. Once puntos (de los 114) poseen errores superiores a  $\pm 100$  m, 52 puntos poseen errores superiores a  $\pm 30$  m.



El contraste entre niveles medidos y calculados (Figuras IV.16 y IV.17) no muestra diferencias significativas con el escenario 2, de hecho el error medio para ambos escenarios es similar.

#### **6.4. Escenario 4: Zonificación 4 de la conductividad**

La zonificación de K resultante se muestra en la Figura IV.18, con un total de 31 zonas definidas adoptando como criterio la piezometría de LEBAC. El rango de conductividades calibradas fue de 0,9 m/d a 35 m/d, con valores más elevados en las zonas 3 y 27 (Tabla IV.6). Las conductividades de las zonas 9 y 16 no se calibraron, fijándose su valor en 75 m/d y 100 m/d, respectivamente. Vuelven a aparecer dos zonas (K3 y K30) con conductividades superiores del resto, indicando nuevamente la presencia de algún tipo de control sea estructural sea geológico que no está siendo del todo considerado en el modelo conceptual a validar.

Cualitativamente las curvas piezométricas simuladas (Figura IV.19) muestran una configuración similar a la anterior, aunque se esbozan mejor patrones definidos en el modelo conceptual con respecto a la curva de 400 m.

Mediante esta zonificación se logró reducir el error medio a 44,41 m, sólo 3 puntos presentan errores mayores a +/- 100 m, mientras que 51 presentan errores mayores a +/- 30 m. Esto indica que mejoraron los errores extremos, esto es los errores están mejor distribuidos (Figuras IV.20 y IV.21).

El contraste entre niveles medidos y calculados (Figuras IV.22 y IV.23) no muestra diferencias significativas con el escenario 3.

#### **6.5. Escenario 5: Zonificación 5 de la conductividad**

Las diferentes zonificaciones basadas en la piezometría permitieron reducir el error medio de la simulación. No obstante se planteó una nueva estrategia de zonificación basada en el mapa de espesores (Figura 4.1), definiendo 17 zonas (Figura IV.24). La zona de conductividad de 15 fue fijada en 20 m/d y se calibraron las restantes, resultando un rango entre 1,2 m/d y 25,3 m/d. Se reiteran zonas de mayor K (K16, K10, K12) en sitios similares a las simulaciones anteriores,

En términos generales las curvas isopiezas simuladas (Figura IV.25) son similares a las anteriores, con algunas discrepancias claras producto del criterio



diferente usado en la zonificación. Particularmente nótese las curvas de 100 m en Argentina, 250 m y 400 m.

El error medio resultó 52,6 m, donde 9 puntos presentaron errores mayores a  $\pm 100$  m, mientras que 62 presentaron errores mayores a  $\pm 30$  m. Esto indica que desmejoraron levemente los errores respecto a las simulaciones anteriores.

Observando la distribución de errores en los puntos de observación (Figura IV.26), al igual que en todos los escenarios anteriores, persisten errores superiores a 100 m, de ambos signos, en el estado de São Paulo, que las diferentes zonificaciones no lograron mejorar. Esto indicaría la necesidad de redefinir el modelo conceptual, en particular en lo relacionado a la presencia de lineamientos o fallamientos. Si se grafican la totalidad de los pozos de observación (Figura IV.27) se corroboran las conclusiones anteriores, con una mayor densidad de puntos.

El contraste entre niveles medidos y calculados (Figuras Figura IV.28 y Figura IV.29) no muestra diferencias significativas con los escenarios 3 y 4.

## 6.6. Escenario 6: Descarga a través de los basaltos

Progresivamente las zonificaciones condujeron a una disminución de los errores en los puntos de observación. La comparación de las curvas piezométricas simuladas con las trazadas por LEBAC (LEBAC, 2008) guarda similitudes en zonas de grandes gradientes, sistemas de recarga/descarga locales, sector argentino, no así en el centro del área modelada, en particular el trazado de la curva de 350 m.

Todos los escenarios anteriores dieron como resultado conductividades calculadas superiores en la zona central (en coincidencia con la mencionada curva) con respecto al resto del área modelada y de las conductividades esperables para areniscas, aun considerando un efecto de escala. Esto refleja la necesidad del modelo de conducir flujos. En orden a reducir esos valores de K a valores más coherentes, una alternativa posible (entre otras) es incluir una conexión hidráulica entre el SAG y los basaltos que constituya una zona de descarga o flujo ascendente.

Sobre la zonificación del Escenario 4 (31 zonas de K), se incluyó un área de descarga (simulada como goteo) ubicada aproximadamente paralela al río Paraná al norte de la cola del embalse de la represa de Itaipú. En la Figura IV.30 se la identifica con un área punteada. En la misma figura se aprecia el cambio notable resultante en la piezometría de la zona, que se asemeja al modelo conceptual. Esto



indica que la hipótesis de impermeabilidad de los basaltos y el trazado de la curva de 350 m deben revisarse en estudios futuros.

La conductividad calibrada de la zona 3 se redujo de 144 m/d (Escenario 4) a 4,7 m/d, valor mucho más coherente. Lo mismo ocurrió con la zona 30, inmediatamente aguas debajo de la anterior, que disminuyó de 34,6 m/d a 4,6 m/d. Es decir que se logró el objetivo buscado. Para estimar el coeficiente de goteo de la nueva zona de descarga se probaron varias conductividades de basalto. Finalmente, se adoptó el valor de  $1 \times 10^{-2}$  m/d por resultar en el conjunto de parámetros más coherentes y el menor error medio (44,11 m).

La distribución espacial de errores en puntos de calibración se observa en la Figura IV.31. Solo un punto posee un error superior a 100 m y 51 puntos tienen errores por arriba de  $\pm 30$  m. En la totalidad de los puntos (Figura IV.32) se repite el patrón de distribución. Las figuras IV.33 y IV.34 muestran la comparación entre valores medidos y calculados.

El escenario planteado tuvo un fin muy específico. Sin embargo la conexión entre el SAG y los basaltos puede tener lugar en zonas por el momento desconocidas. Dadas las características de surgencia del acuífero en una gran extensión de confinamiento, en ellas la condición de flujo ascendente es la más probable. Sin embargo, en zonas de menores espesores cercanas a las de afloramiento puede haber meteorización, fracturamiento más intensivo y por ende recarga. En Rivera-Santana se midieron nivel de agua en basaltos 50 m por encima de los niveles someros de areniscas (Rodríguez et al., 2006).

## 6.7. Escenario 7: Análisis del efecto de las estructuras

Considerando la reciente publicación de la tesis de Soares (2008) como las mediciones hidrogeoquímicas e isotópicas del SAG realizados en el proyecto, se analizó el efecto de la presencia de mega estructuras de alcance regional que podrían condicionar el sistema de flujos tanto local como regional dependiendo de la extensión de la misma.

En primer lugar se superpusieron las estructuras a la zonificación de K uniforme para aislar su efecto (Figura IV.35). Las conductividades calibradas se muestran en la Tabla IV.12. El valor de K1 resultó prácticamente igual al del escenario 1, mientras que la conductividad K2 de la estructura de sentido noreste-sureste fue de 154,1 m/d y para la de menor tamaño fue de 0,5 m/d. La



piezometría en zonas cercanas a las estructuras varía, indicando su efecto notorio (Figura IV.36). El error medio fue de 67,2 m, sólo 1 m por debajo del error medio del escenario 1 (K uniforme, sin estructuras).

Las figuras IV.37 y IV.38 muestran la distribución geográfica de errores. Considerando los puntos de calibración, 16 poseen un error mayor a  $\pm 100$  m y 61 un error mayor a  $\pm 30$  m. Las figuras IV.39 y IV.40 muestran la comparación de niveles medidos versus calculados.

Posteriormente se superpusieron las estructuras a la zonificación basada en espesores (Escenario 4), según se muestra en la Figura IV.41. Las conductividades de las dos estructuras se fijaron en los valores obtenidos en el escenario de K uniforme, es decir 154 m/d y 0,5 m/d. Las nuevas K calibradas (Tabla IV.14) resultaron similares a las del escenario 4, excepto que se incrementaron en la zona superior izquierda (zona 2) y en la zona 16, aguas arriba de la estructura regional.

La Figura IV.42 muestra las isopiezas calculadas. El error medio fue de 53,7 m, 7 puntos de observación tienen errores por encima de los  $\pm 100$  m y 56 por arriba de  $\pm 30$  m. Las figuras IV.43 y IV.44 muestran la distribución geográfica de errores. Su ubicación geográfica es la misma que la de las simulaciones anteriores, esto es, se debe revisar con cuidado en futuros estudios las razones de la falta reiterada de ajuste para las distintas estrategias de calibración, que pueden deberse a problemas del modelo conceptual, explotaciones y/o calidad de las medidas.

Además de reducir el error de calibración, las existencias de mega estructuras podría condicionar el sistema de flujos tanto local como regional dependiendo de la extensión de la misma. La identificación de los sistemas de estructuras que pueden influenciar patrones de flujo debe analizarse con mayor profundidad en el futuro.

## 6.8. Análisis transitorio

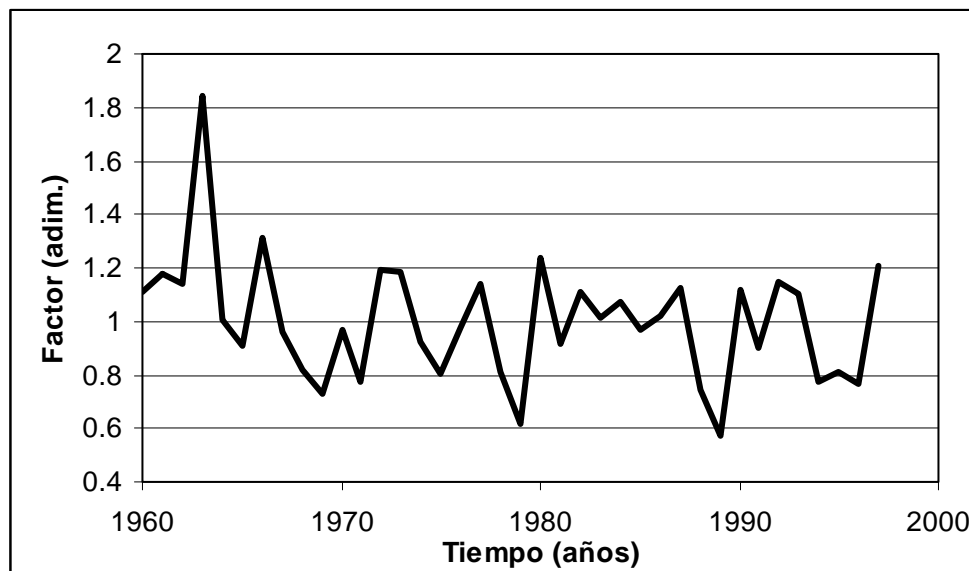
En teoría, una simulación estacionaria debería representar el estado del sistema antes de que se inicien las explotaciones, o por lo menos cuando el grado de explotación es reducido de tal manera de que la afectación del sistema natural es despreciable. Posteriormente, se realiza una simulación transitoria, es decir variable en el tiempo, incorporando progresivamente las explotaciones a medida





que se incrementa el bombeo, para lo cual se necesita no sólo una evolución temporal del bombeo sino también de los niveles piezométricos. Lamentablemente, en este proyecto no se dispuso de esta información. Los datos de niveles medidos utilizados corresponden al momento de la construcción de los pozos (cuya fecha se desconoce en la mayoría de los casos), en consecuencia abarcan una ventana temporal de 20-30 años a partir del año 1970, y la estimación de las explotaciones es una aproximación a la situación actual. Por ello, las simulaciones estacionarias anteriores incluyeron las explotaciones.

Con el fin de emular la secuencia ideal de calibración, esto es estacionario seguido de un transitorio, se simuló un período de 38 años (1960-1997) utilizando la zonificación del Escenario 4 y un paso de tiempo anual. El primer periodo o situación inicial se simuló como estado estacionario sin bombeo. Para los periodos siguientes se construye una función temporal para las tasas de recarga obtenida de la distribución anual de la lluvia en la estación Rivera-Uruguay (Figura 6.4) y se impone el bombeo desde el inicio de la simulación transitoria manteniéndose constante hasta el final. Las medidas de niveles en los pozos de observación se adoptaron para el último año simulado debido a la carencia de series temporales de niveles.



**Figura 6.4.** Función de tiempo aplicada a la tasa de recarga.



En el proceso de calibración el conjunto de parámetros a calibrar son las conductividades y los flujos prescritos en el borde este (ver Figura 5.9).

Las figuras IV.47 y IV.48 muestran la piezometría calculada en estado estacionario y la calculada al final del período transitorio, respectivamente.

El error medio fue de 38,9 m, sustancialmente menor que el encontrado en el Escenario 4. En los escenarios anteriores, los errores más elevados tanto positivos como negativos estaban situados en la franja perimetral del modelo. En particular, la reducción de los errores extremos en el borde este y zona central fue posible debido a que además de las conductividades, se calibró el flujo prescrito en el borde este, el que resultó con un valor de 300 m<sup>3</sup>/s. En los escenarios 1 a 6 tenía una magnitud de 21,2 m<sup>3</sup>/s. La disminución de errores extremos en el estado de São Pablo y otras zonas alejadas de la influencia del flujo de borde es producto de la función temporal que afecta la tasa de recarga. Las figuras IV.49 y IV.50 muestran la distribución geográfica de errores para puntos de calibración y todos los pozos de observación, respectivamente. El error supera 100 m en un solo punto, mientras que supera +/- 30 m en 49 puntos.

En general todas las K calculadas (Tabla IV.16) se incrementaron con respecto a los valores del Escenario 4, esto se explica por la variabilidad temporal de la recarga (años por encima de la precipitación media anual y años por debajo) y el apreciable incremento del flujo en el borde que contribuyen a incrementar los flujos internos del sistema, que deben transmitirse desde las zonas de recarga y borde hacia las zonas de descarga.

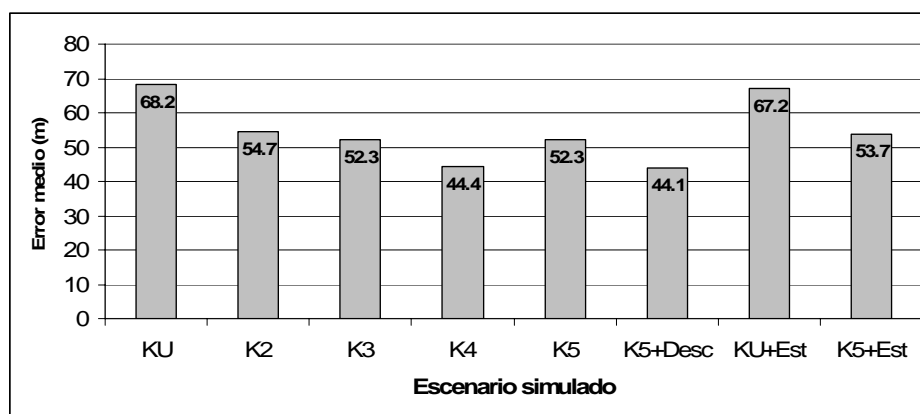
La comparación de valores medidos y calculados en puntos de calibración (Figura IV.51) evidencia la reducción de los errores extremos, prácticamente todos los puntos están comprendidos entre las rectas de +/- 50 m en torno a la recta a 45°. En cambio si se analiza la totalidad de los puntos (Figura IV.52) existen importantes sobreestimaciones para niveles piezométricos elevados, aparentemente debido a procesos locales.

## 6.9. Análisis de resultados

Las distintas zonificaciones permitieron mejorar progresivamente la calibración (Figura 6.5), obteniéndose el menor error medio con la Zonificación 4.



Se demostró que la hipótesis de conexión hidráulica entre el SAG y los basaltos es plausible, en tanto que es capaz de reproducir algunas de las características del modelo conceptual que no pudieron replicarse con las zonificaciones anteriores y de reducir los valores de K calibrada en la zona central del modelo. Asimismo, el posible efecto de estructuras regionales delineadas en base a los antecedentes, impuestas sobre la simulación de conductividad uniforme y con la zonificación 5, logró reducir levemente el error medio con respecto a los resultados obtenidos.



**Figura 6.5.** Proceso de calibración – Evolución del error medio

El balance de masa global (Tabla 6.1 y Figura 6.6) para todos los escenarios en estado estacionario muestra que los flujos involucrados en el sistema son muy pequeños en comparación con los caudales mínimos de los principales ríos del sistema superficial (ríos Uruguay, Paraguay o Paraná). La recarga y el flujo que descarga el acuífero en los ríos constituirá las componentes dominantes. El flujo que entra y sale a través de los bordes donde se fijó el nivel piezométrico es despreciable. En la simulación en estado estacionario con bombeo, las explotaciones sumarían un 29 % de la recarga. En conjunto los 33 tramos de ríos, simulados como condiciones de goteo, descargan unos 110 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente la mitad del caudal mínimo histórico registrado en el río Uruguay.

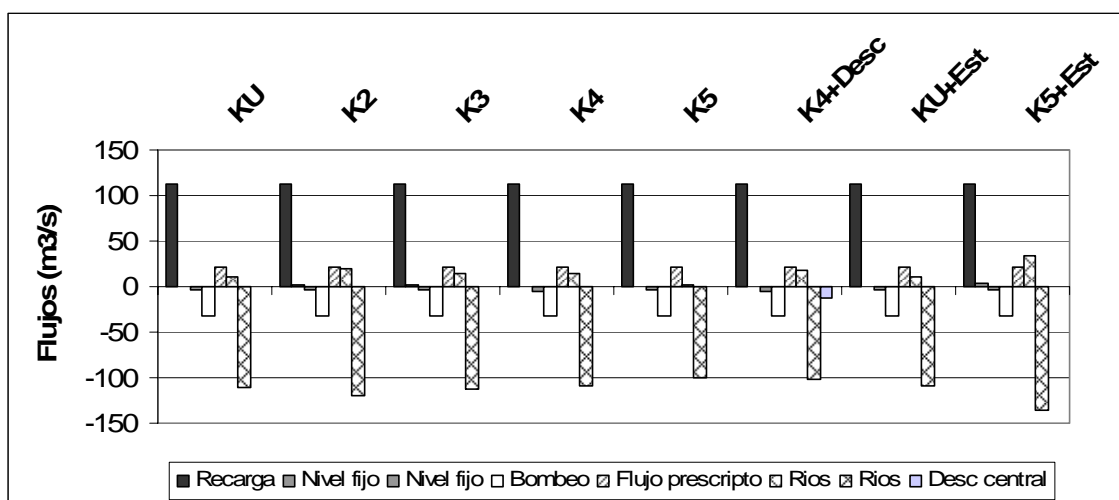
En la Figura 6.7 se analiza la interacción con el sistema superficial con el subterráneo en un conjunto de ríos (Tabla 5.1 y Figura 5.8). El río Araguaia muestra gran sensibilidad a las diferentes zonificaciones, en los demás casos, los cambios no son significativos. Lamentablemente no existen mediciones hidrométricas en los ríos menores para verificar los flujos simulados. En orden a



verificar algunos términos de balance sería deseable contar con balances hídricos en subcuencas superficiales ubicadas en zonas de afloramiento del SAG. En el caso de los tramos del Uruguay y del Paraná, los flujos involucrados son extremadamente pequeños, y no podrían identificarse mediante registros de caudales convencionales, debiendo recurrirse a técnicas hidroquímicas para una posible determinación en campo. El caudal módulo de los ríos Paraná (Estación Itatí) y Uruguay (Estación El Soberbio) es 12.259 y 2.672 m<sup>3</sup>/s, respectivamente (MPF, 2004). Es importante resaltar que el flujo de descarga calculado en las simulaciones realizadas del SAG al río Paraná (0,9-1,8 m<sup>3</sup>/s) es aproximadamente un 10% del que recibiría el Uruguay (7,4 a 9,8 m<sup>3</sup>/s).

**Tabla 6.1.** Balance de masa global (m<sup>3</sup>/s). Flujos negativos indican salidas del acuífero y flujos positivos entradas.

Escenario	Recarga	Nivel fijo		Bombeo	Flujo prescripto	Ríos		Desc. central
		Entradas	Salidas			Entradas	Salidas	
KU	113.04	0.83	-2.90	-32.94	21.18	10.78	-110.00	
K2	113.04	2.09	-3.85	-32.94	21.18	20.42	-119.93	
K3	113.04	1.18	-3.40	-32.94	21.18	14.09	-113.13	
K4	113.04	0.00	-5.99	-32.94	21.18	13.89	-109.16	
K5	113.04	0.00	-3.40	-32.94	21.18	1.57	-99.74	
K4+Desc	113.04	0.00	-5.10	-32.94	21.18	18.68	-101.60	-13.27
KU+Est	113.04	0.81	-2.86	-32.94	21.18	9.84	-109.05	
K5+Est	113.04	4.38	-4.03	-32.94	21.18	34.52	-136.14	



**Figura 6.6.** Balance de masa global

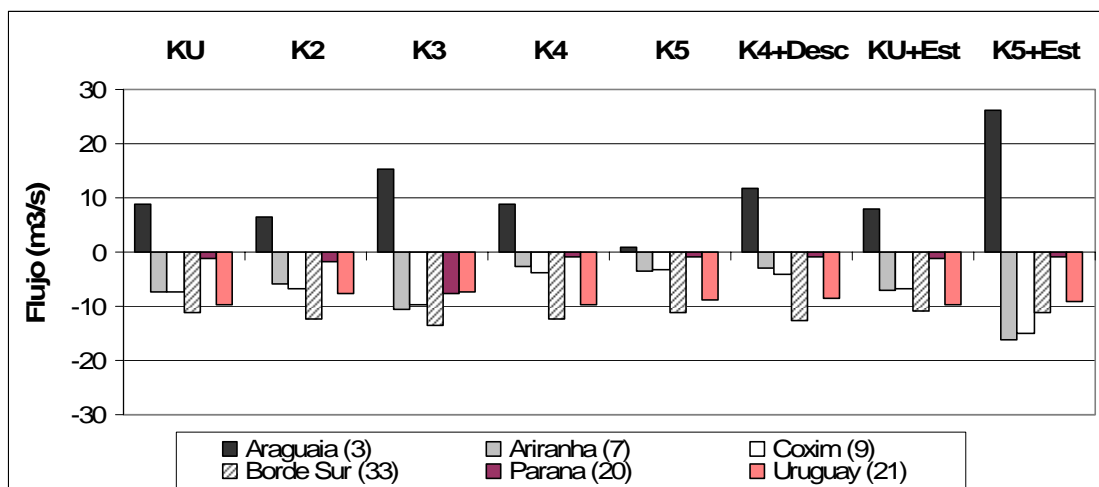


Figura 6.7. Flujo en ríos seleccionados.



## 7. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

Los modelos numéricos, además de su uso como herramientas de validación del modelo conceptual del funcionamiento hidráulico de acuíferos, permiten analizar la respuesta dinámica del sistema subterráneo ante variaciones en las solicitudes externas, sean por incremento de los volúmenes de explotación sean por fluctuaciones de la recarga por efecto del régimen de precipitaciones.

En este caso se estudiaron los efectos de un posible aumento de las extracciones en el corredor termal argentino/uruguayo y en la región oeste del Estado de São Pablo, para la zonificación de conductividad hidráulica correspondiente al Escenario 4.

La implementación del aumento de las extracciones se hace en la zona de bombeo 2 para el corredor termal y en las zonas 14, 15, 16, 17, 18 para la región oeste del Estado de São Pablo (ver Figura 5.8). Las ciudades comprendidas en cada zona se listan en la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1.** Principales ciudades en zonas de bombeo empleadas en la predicción.

Zona	Ciudades
2	Corredor Termal del Río Uruguay
14	Ribeirão Preto - Jardinópolis - Sertãozinho - Barrinha - Pradópolis - Pontal
15	Araraquara - Américo Brasiliense - Santa Lucía - Ipeúma - Matão
16	São Carlos - Ibaté - Brotas
17	Baurú - Agudos
18	Bofete - Descalvado - Botucatu

Se realizaron tres simulaciones en régimen transitorio para un período de 100 años (36.000 días), con paso de tiempo anual. En la primera se mantuvo el caudal de bombeo actual durante el período simulado ( $Q_{actual}$ ). En la segunda (2Q) y tercera (3Q) se mantuvieron todas las características de  $Q_{actual}$  incrementando el bombeo en un 100 % y 200 %, respectivamente.

Además se definió una función temporal de variación de la recarga en los 100 años definida a partir de la serie histórica de precipitaciones mensuales para la serie 1901-2001, obtenida de la base de datos de CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, Inglaterra). Dichos datos son sintéticos y fueron estimados a partir de una red global de estaciones meteorológicas, para puntos de



grilla espaciados  $5^{\circ}$  entre sí. En este caso se utilizaron los datos del punto  $30^{\circ} 15'$  latitud sur, y  $55^{\circ} 15'$  longitud oeste, cercana a las localidades de Rivera y Santana do Livramento. La Figura 7.1 muestra la serie anualizada. Nótese que la media de 1550 mm es superada con mayor frecuencia y montos mayores en la segunda mitad de la serie, lo que se transformará en más recarga. Este efecto puede verse claramente en la Figura 7.2, donde se graficó la función de tiempo aplicada a las tasas de recarga. La línea de tendencia muestra que en los primeros 50 años en promedio la precipitación anual fue menor que el promedio histórico (función de tiempo  $< 1$ ), en la segunda mitad fue mayor (función de tiempo  $> 1$ ).

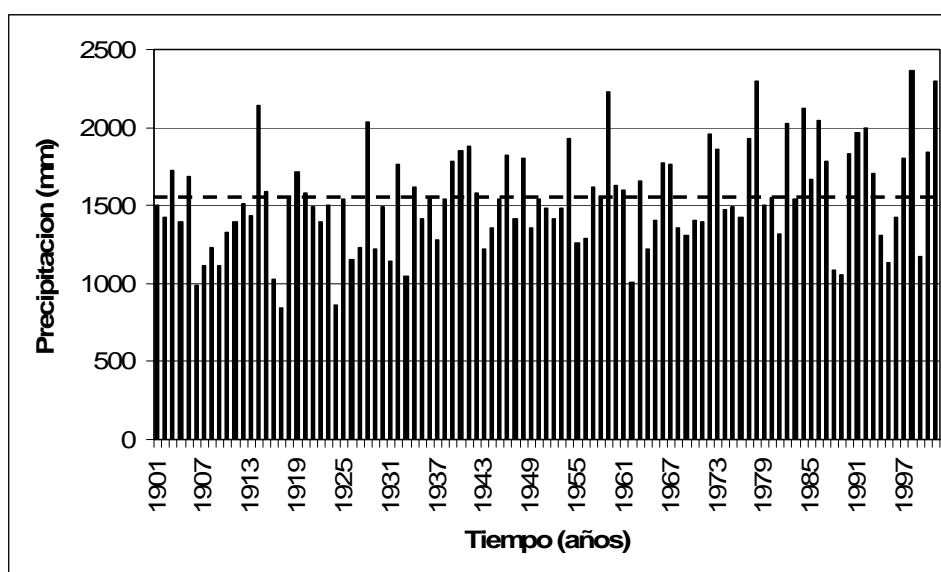


Figura 7.1. Precipitación anual serie 1901-2001 en punto de grilla cercano a Rivera-Santana

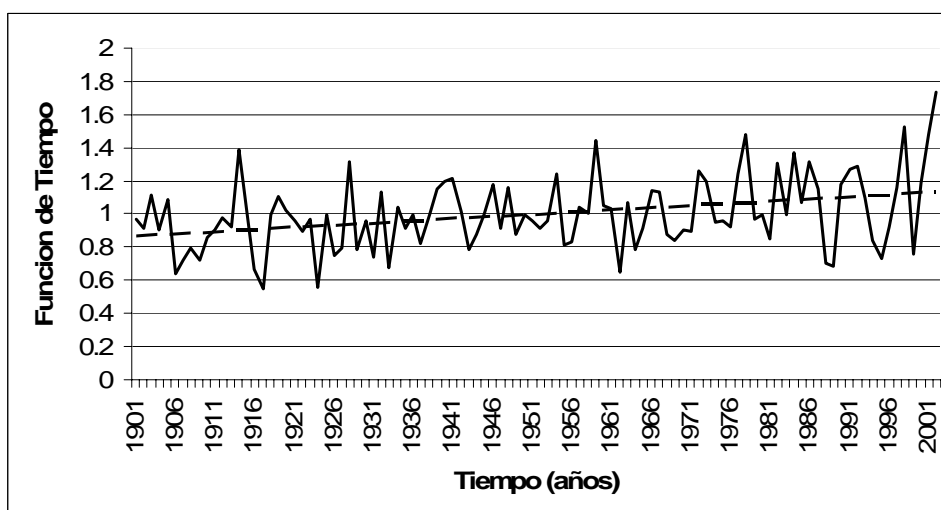


Figura 7.2. Función de tiempo para la serie anual 1901-2001.



Con el fin de analizar el efecto del incremento de las explotaciones sobre el sistema se analizó la diferencia de nivel o descenso que se registraría en puntos específicos del acuífero durante el tiempo de simulación. Para ello se seleccionaron trece puntos del SAG que se denominaron puntos de control de niveles piezométricos o pozos virtuales cuya ubicación se muestra en la Figura 7.3. Para conocer el radio de influencia de estas explotaciones se ubicaron algunos de los pozos virtuales dentro de las zonas de explotación, otros en las cercanías y otros alejados de ellas. El uso del término “pozos virtuales” obedece a una convención, sin que lleven consigo una definición de sus características constructivas. Se trata simplemente de puntos del dominio de modelación donde se analiza la evolución de niveles para todos los pasos de tiempo de la simulación transitoria.

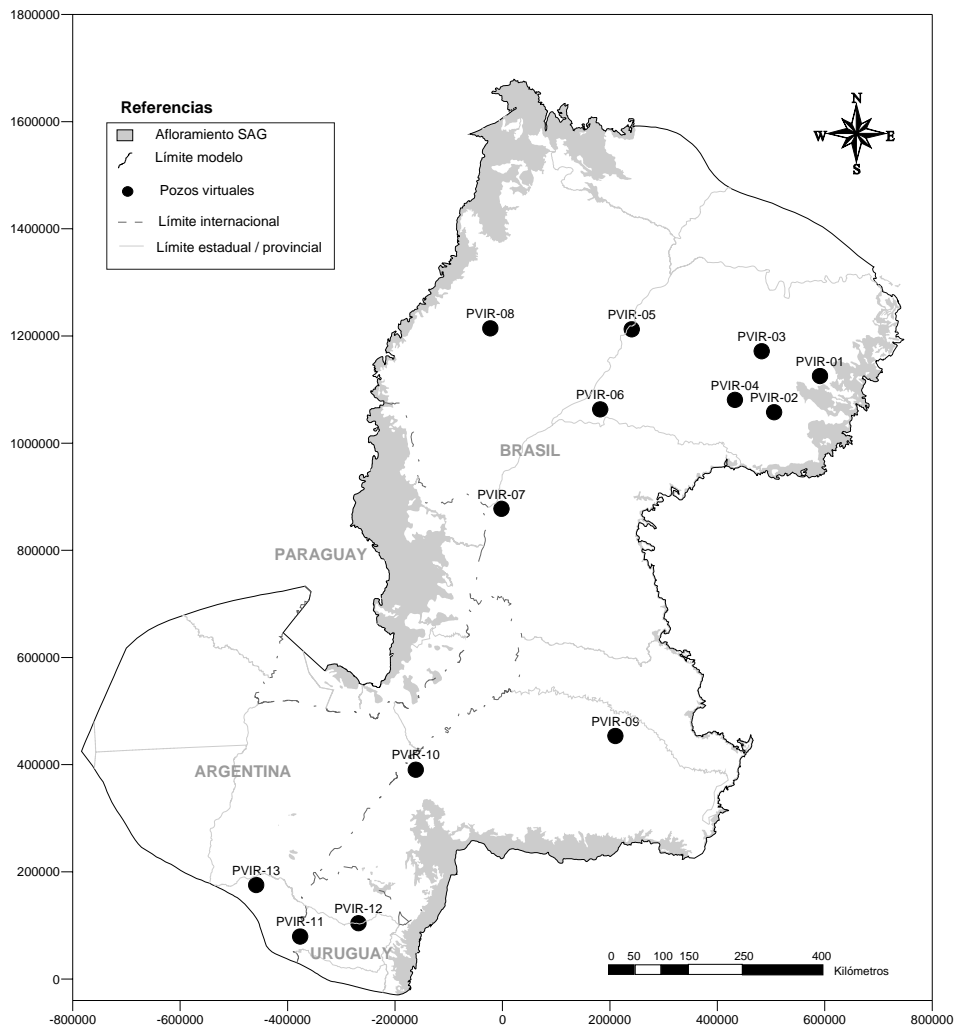


Figura 7.3. Ubicación de puntos virtuales o de control.





En la Figura 7.4 se presentan los hidrogramas de niveles piezométricos calculados en los pozos virtuales. Nótese la diferencia de escalas verticales en los hidrogramas. Los PVIR-01 y PVIR-02 son los más afectados por el incremento de la explotación, con un descenso máximo de niveles 99 m y 85 m, respectivamente, al final de los 100 años de simulación, para el caso de 200 % de incremento del bombeo. En PVIR-03, ubicado aproximadamente a 130 km al oeste de PVIR-01, y PVIR-04, a 100 km al oeste de PVIR-02, se observa un comportamiento opuesto. El incremento de niveles es relativamente pequeño (2-3 m), y puede deberse a que la condición inicial en la cercanía de los mismos no está en equilibrio. En régimen transitorio el sistema tiende a buscar esa condición, en tanto el efecto del bombeo cercano recién comienza a notarse luego de 50 años del inicio de la simulación en el pozo más alejado y en 30 años en el más cercano.

Los PVIR-05, PVIR-06 y PVIR-07, ubicados lejos de la zona de explotación, muestran un comportamiento similar. No se ven afectados por la explotación y la variación de niveles es menor a 1 m. En PVIR-08 y PVIR-10 se observa una disminución de niveles que no es consecuencia del régimen de explotaciones sino producto de la condición inicial.

En PVIR-11, PVIR-12 y PVIR-13, ubicados en zona de gran confinamiento, se observa el efecto escalonado en el tiempo del incremento del bombeo. En el primero se produce un descenso máximo de unos 12 m al cabo de 100 años explotando a un caudal 2 veces mayor que el actual. El efecto es inmediato. En los otros dos se evidencia el efecto pero la disminución de niveles es de unos pocos centímetros y se percibe más allá de los 50 años de iniciada la simulación.

En conclusión, los efectos del incremento de la explotación son notorios e inmediatos en sitios cercanos al bombeo, mientras que se registran en forma escalonada en el tiempo (a los 30, 50 o 60 años según el sitio) a medida que uno se aleja de la explotación. Más allá de los 300 km, el efecto del bombeo sería imperceptible, al menos en las condiciones impuestas en el escenario de explotación realizado (100 años).

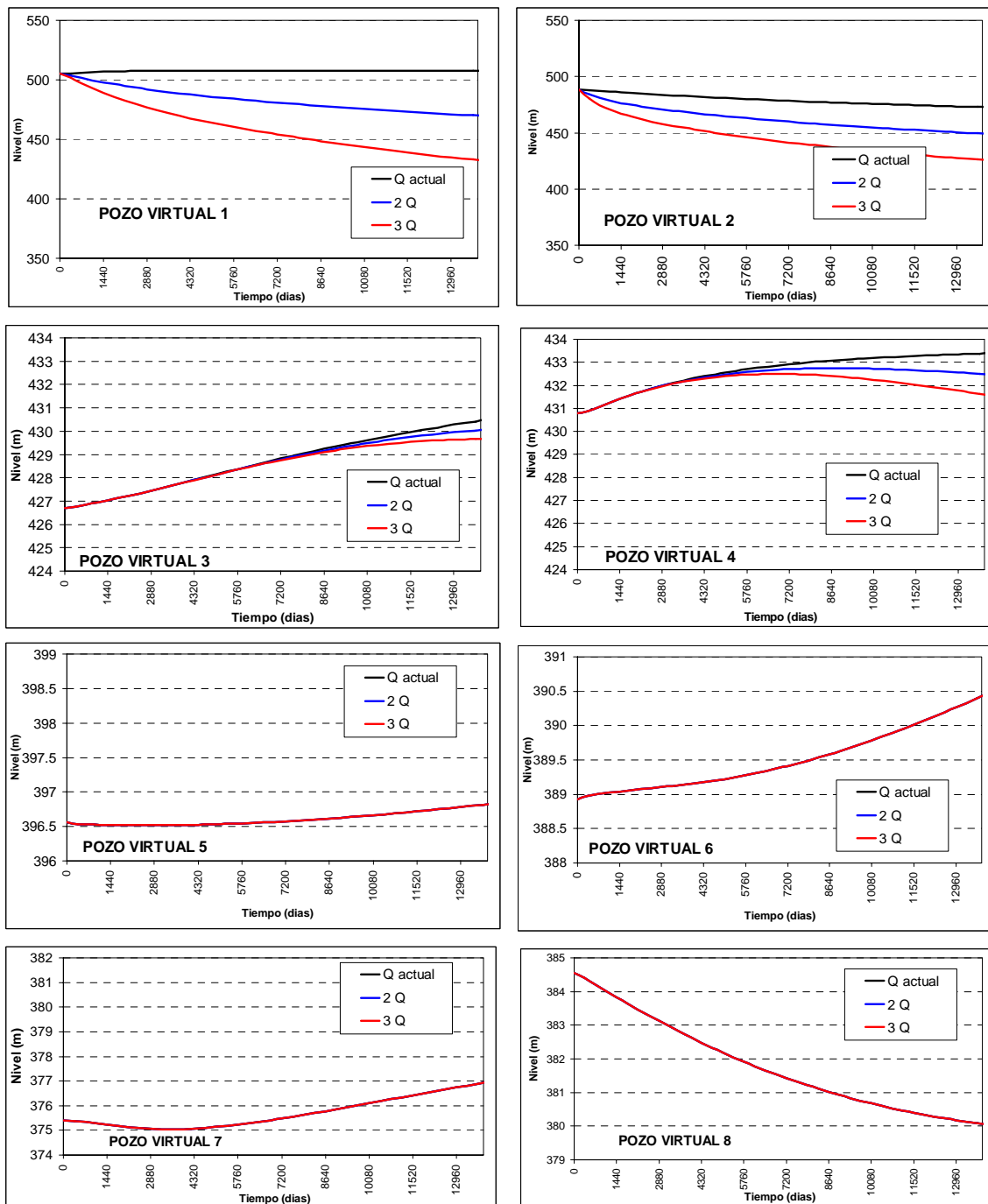


Figura 7.4. Hidrogramas de pozos virtuales o de control del 1 al 8.

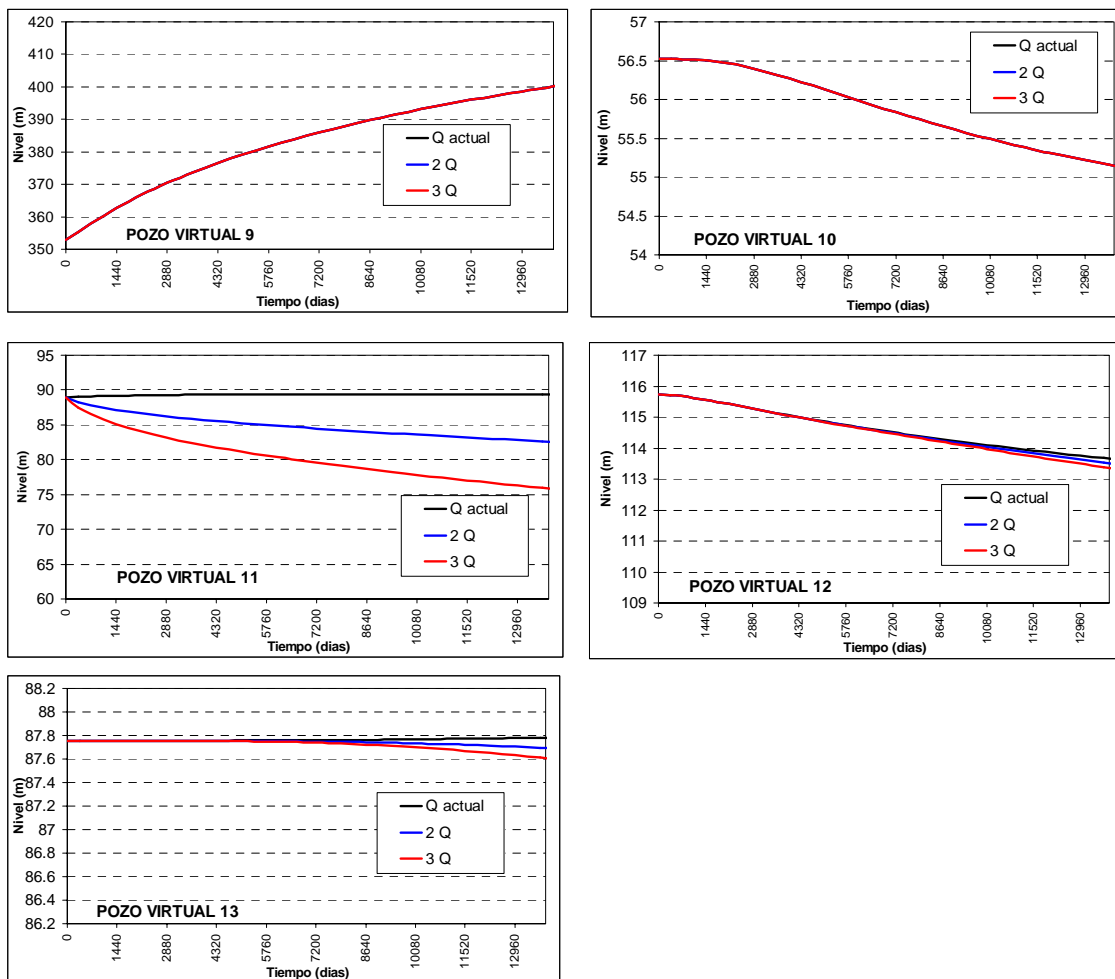


Figura 7.5. Hidrogramas de pozos virtuales o de control del 9 al 13.



## 8. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES y LINEAS FUTURAS

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones que surgen de la modelación numérica regional del SAG que podrían interpretarse en desmedro de los trabajos de otras componentes del proyecto, situación que bajo ningún aspecto es interés de los autores transmitir. El trabajo realizado por las componentes de este proyecto es excelente y en oportunidades alcanza metas superiores a los objetivos propuestos inicialmente. Si es importante resaltar que, debido al flujo de llegada de los componentes hacia la finalización del mismo, su rápida integración ha conducido a una conceptualización del comportamiento del sistema SAG que es posiblemente mejorable o al menos revisable.

Desde el punto de vista exclusivo del modelo regional se ha percibido una importante mejora respecto al premodelo de Vives et al. (2001), fundamentalmente en: dominio de simulación, mayor información de puntos de medidas confiables, un amplio análisis geológico estratigráfico, y un profundo tratamiento de las extracciones. Sin embargo es necesario continuar y profundizar el análisis del sistema como un todo, integrando explícitamente las estructuras más expresivas u otras que se identifiquen como importantes, las zonificaciones delineadas por los análisis isotópicos e hidrogeoquímicos y las unidades confinantes del SAG. Así se podrán definir cada vez con mayor certeza las hipótesis del funcionamiento hidráulico acuífero y el complejo sistema de flujos que lo caracteriza.

### 8.1. Conclusiones

Partiendo de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios analizados se puede obtener a las siguientes conclusiones, algunas de ellas son aportes exclusivos de esta componente del proyecto:

- El dominio de modelación, que se extiende a todo el SAG operativo, permite realizar una modelación numérica más realista que las precedentes.
- La modelación de diferentes escenarios geológicos con resultados aparentemente comparables podría estar indicando la necesidad de continuar investigando y mejorando tanto el modelo geológico-estructural como hidrogeológico.



- La dirección predominante de flujo a nivel regional es de norte y este hacia el centro de la cuenca, influenciada por las características tectónicas/estructurales de la cuenca sedimentaria.
- Los gradientes hidráulicos simulados resultan en general similares a los planteados en el modelo conceptual, teniendo presente que el mapa potenciométrico integra niveles medidos en un intervalo de 20-30 años.
- El borde occidental de afloramiento es una región de recarga local y de descarga tanto regional como local.
- Las simulaciones indicarían que los tramos de numerosos cursos superficiales en zonas de afloramiento podrían ser vías de descarga del acuífero, al menos de los niveles más someros, reduciendo la recarga profunda.
- Los valores de conductividades hidráulicas calibradas o calculadas tienden a ser mayores que los esperados. Este efecto puede deberse a que el modelo no representa las unidades infra y suprayacentes ni las estructuras, o que los flujos de agua sean aún más pequeños de los que se han calculado, o una mezcla de ambas situaciones.
- La hipótesis de descarga regional del SAG a través de tramos de los ríos Uruguay y Paraná resulta plausible y compatible con las demás componentes del balance de masa. Este flujo es del orden de 0,9-1,8 m<sup>3</sup>/s y 7,4 a 9,8 m<sup>3</sup>/s para el río Paraná y Uruguay, respectivamente. Es decir, el río Paraná estaría recibiendo del SAG un 10% de lo que recibe el Uruguay.
- La hipótesis de flujos ascendentes desde el SAG hacia las formaciones suprayacentes en un sector central (localización tentativa) resulta plausible dada la surgencia en dicha zona y las grandes diferencias de espesores de basalto a un lado y otro de la calia central. Esto podría dar lugar a discontinuidades litológicas importantes favoreciendo potenciales flujos preferentes.
- Los términos dominantes del balance de masa son la recarga y la descarga hacia los ríos. Para las simulaciones estacionarias, las explotaciones son del orden de 1.040 hm<sup>3</sup> por año que corresponden al 29 % de la recarga calculada.



- Los flujos subterráneos del balance de masa, aunque no pueden verificarse con estimaciones independientes, son pequeños comparados con los caudales mínimos de los ríos Uruguay y Paraná.
- Los efectos del incremento de la explotación son notorios e inmediatos en sitios cercanos al bombeo, mientras que se registran en forma escalonada en el tiempo a medida que uno se aleja de la explotación. Más allá de los 300 km, el efecto del bombeo sería imperceptible, al menos en las condiciones impuestas en el escenario de explotación realizado (100 años). Es importante tener presente que no se ha modelado la calidad del agua.
- Se ha mostrado la potencialidad y necesidad de calibrar el modelo numérico para un transitorio, fundamentalmente por el bajo flujo subterráneo que podría determinar regiones donde puede ser afectado el almacenamiento, modelo fundamental para el gerenciamiento sustentable de los recursos subterráneos en acuíferos con poca tasa de renovación.

## **8.2. Recomendaciones y líneas futuras de Investigación**

- Integrar el modelo conceptual propuesto por el LEBAC con las informaciones recolectadas o generadas al final del proyecto (isotopía, hidroquímica, geofísica, etc.).
- Analizar numéricamente la hipótesis de compartimentación geológica del SAG y su influencia en los flujos de agua.
- Analizar cómo las formaciones pre-SAG pueden afectar la piezometría y los flujos.
- Construir un mapa de espesores de la Formación Serra Geral y sus características zonales. Analizar la posibilidad de flujos de agua horizontales entre coladas como de zonas de alteraciones en vertical.
- Analizar los numerosos antecedentes a nivel mundial de escurrimientos preferenciales en basaltos fracturados. En ausencia de datos de campo en el SAG, este análisis permitiría hacer inferencias acerca de sistemas de flujos regionales y/o locales.



- Ampliar el conocimiento y analizar regionalmente las estructuras menores que no han sido incluidas en el SAG operativo, cuya hipótesis es de un medio continuo. Esto permitirá reproducir algunas anomalías tanto piezométricas como hidroquímicas.
- Completar información y construir un mapa de distribución de conductividades hidráulicas o de transmisividades que ayude en la calibración del modelo numérico.
- Estudiar con más detalle y precisión los flujos de agua, en especial la recarga en la zona de afloramiento y las extracciones, con el objetivo de cuantificar el flujo base de los cursos y la recarga profunda. Posiblemente partiendo de balances locales de cuencas hidrológicas en las zonas de afloramiento se puedan estimar esas componentes.
- Medir con mayor precisión la interacción entre el SAG y los ríos Paraná como Uruguay. Posiblemente aplicando métodos químicos y/o isotópicos se pueda medir la interacción entre los flujos superficiales y subterráneos.
- Estudiar la posible interacción del río Paraná en el sector medio, aguas arriba de la represa de Itaipú, con el SAG. Una forma rápida y sencilla puede ser a través de mediciones continuas de caudales o niveles del río y contrastarlos con hidrogramas de algunos pozos cercanos al curso durante un periodo de tiempo de algunos años.
- Resultaría sumamente interesante la modelación de la edad del agua para validar las hipótesis que se propongan del análisis de los datos isotópicos, como así también la modelación del transporte de algún elemento traza.
- Estudiar la posibilidad de determinar la interacción del agua dulce y salobre en la zona sur del SAG.
- Recolectar de los pozos seleccionados en el proyecto datos temporales de niveles, caudales y bombeos para intentar la posibilidad de modelar el SAG en régimen transitorio.

Es necesario abordar estos aspectos en futuras investigaciones para incrementar la confiabilidad del modelo conceptual y por ende la del modelo numérico desarrollado a posteriori para su validación.



## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pudo ser posible gracias al apoyo y contribución de numerosas personas e instituciones a los cuales queremos agradecer:

- Integrantes de la Organización de Estados Americanos, Secretaría General del PSAG y Coordinadores Nacionales.
- Integrantes del Consorcio Guaraní, en especial al Coordinador Técnico Dr. Gerardo Veroslavsky y a la Lic. Josefina Marmisolle, a los consultores Dr. Ramón Aravena (University of Waterloo), Dra. Marisol Manzano (Universidad Politécnica de Cartagena) y Msc. Alejandro Oleaga (Ingersur).
- Dr. Didier Gastmans y MsC. Márcia Maria Nogueira Pressinotti del Laboratório de Estudos de Bacias de la UNESP, Rio Claro, Brasil.
- Empresas Seinco (Uruguay) e Hidroestructuras (Argentina).
- Dr. Jesús Carrera Ramírez Investigador del Instituto Jaume Almera de Ciencias de La Tierra, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Barcelona, España
- Dr. Paulo César Horta Rodrigues del CDTN Belo Horizonte, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Brasil.
- Dr. Gerhard Schmidt del Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR), Alemania.
- Dr. Luis Araguás Araguás de la Agencia Internacional de Energía Atómica.
- Dr. Ricardo Hirata de GWMATE, GEF-Banco Mundial-OEA.
- Lic. Daniel Bogetti (PyT Consultores), Dr. Cesar Garrasino (Geodatos) y Lic. María L. Rodríguez Schelotto (LCV), Argentina.
- Msc. Luis Pertov, consultor en temas de cartografía.
- Ing. Eduardo Zamanillo de la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, Concordia, Argentina.
- Ing. Carlos Paoli e Ing. Ricardo Giacosa del Centro Regional Litoral del Instituto Nacional del Agua, Santa Fe, Argentina.





## BIBLIOGRAFÍA

- BENJAMIN J. Y CORNELL A., 1970. **Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers**. McGraw Hill, Inc. USA.
- CAMPOS H.C.N.S., 2000. Modelación Conceptual y Matemática del Acuífero Guaraní, Cono Sur. **Acta Geológica Leopoldinense**, São Leopoldo, v.23, n°4, 3-50.
- CARRERA J. and NEUMAN S.P., 1986. Estimation of aquifer parameters under transient and steady-state conditions, Maximum likelihood method incorporating prior information. **Water Resour. Res.**, 22(2), 199-210.
- CARRERA J., GALARZA G., MEDINA A. y VIVES L., 1995. TRANSIN: Modelos de flujo y transporte con simulación de fracturas. **ENRESA**, 10, 28-49.
- CARRERA J. y SÁNCHEZ VILA X., 1994. La influencia de la variabilidad espacial en la incertidumbre de los modelos de transporte de solutos. En: Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas. T. 1. 169-184.
- CUSTODIO E. y LLAMAS J.R., 1976, 1983. **Hidrología Subterránea**. Ed. Omega, Barcelona. pp. 2450.
- El-Kadi A.I. and Moncur J.E.T., 1996. The History of Groundwater Management and Research in Hawaii. Water Resources Research Center, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA. 23 pp.
- FACCINI U.F., GIARDIN A. y MACHADOJ.L.F., 2003. Heterogeneidades Litofaciológicas e Hidroestratigrafia do Sistema Aqüífero Guaraní na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: Paim, P.S.G *et al.* **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares – Estudos de Casos**., São Leopoldo: Programa de Pós Graduação em Geologia - UNISINOS. 147-173.
- FREEZE R. A. and CHERRY J. A., 1979. **Groundwater**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jerse. 604 pp.
- FERREIRA F.J.F., 1982. Alinhamentos Estruturais-Magnéticos da Região Centro-Oriental da Bacia do Paraná e seu Significado Tectônico. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, **Geologia da Bacia do Paraná: reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos**. São Paulo: IPT, 1 ed., v. 1, 143-166.
- GÓMEZ A. (2007). Análisis del comportamiento hidráulico subterráneo de las Formaciones “Tacuarembó – Arapey” del Sistema Acuífero Guaraní en el norte de Uruguay. Tesis de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, Universidad Nacional del Litoral, Argentina. 170 pp.
- LEBAC, 2008. INFORME FINAL DE HIDROGEOLOGIA. Serviço de Hidrogeologia Geral, Termalismo e Modelo Regional do Aqüífero Guaraní - Ref.: SBCC/01/04 – 1/1018.1.



- MACHADO J.L.F. y FACCINI U., 2004. Influência dos Falhamentos Regionais na Estruturação do Sistema Aquífero Guaraní no Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. **Anais**. Cuiabá: ABAS. CD-ROOM.
- MARQUARDT W., 1963. An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. **Journal Society Industrial Applied Mathematics**, 11 (2): 431-441.
- MEDINA A. and CARRERA J., 1996. Coupled estimation of flow and solute transport parameters. **Water Resour. Res.**, 32(10), 3063-3076.
- 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.
- MPF, 2004. Estadísticas Hidrológicas de la República Argentina. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas, Subsecretaría de Recursos Hídricos. 900 pp.
- RODRÍGUEZ L., GÓMEZ A., OLEAGA A., PACHECO F., ROULLIER G., SEOANE N., SILVA BUSSO A. y 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. 251 pp.
- ROSA FILHO E.F., HINDI E.C., ROSTIROLLA S.P., FERREIRA F J.F. y BITTENCOURT AV.L., 2003. Sistema Aquífero Guaraní. Considerações preliminares sobre a influência do Arcode Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. **Revista Águas Subterrâneas**, n. 17, 91-112.
- SAG-PY, 2007. Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay. Informe Técnico de Avance de la Cooperación Técnica entre la Secretaría del Ambiente (SEAM) y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) , financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).
- SCHNEEBELI G., 1966. **Hidraulique souterraine**. Editors Eyrolles, París. 362 pp.
- SOARES A.P., SOARES P.C., BETTÚ D. F. y HOLZ M., 2007. O papel dos lineamentos na compartimentação estrutural da bacia do Paraná. **Revista Geociências**, UNESP.
- SOARES A.P., 2008. Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guaraní: controles estratigráficos e estruturais. Tesis Doctoral del Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Brasil.



VIVES L., 1994. Manual del código INTRANSIN III Versión 2.0. Barcelona, Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Informe interno.

VIVES L., CAMPOS H., CANDELA, L. y GUARRACINO L., 2001. Modelación del acuífero Guaraní. **Boletín Geológico y Minero**, v. 112, Núm. Especial, 51-64. ISSN:0366-0176.



## ANEXO I: SISTEMAS DE PROYECCION

Una de las primeras tareas en el proceso de modelación fue el análisis del sistema de proyección de coordenadas que se utilizaría en la simulación del flujo subterráneo conciliando sus objetivos y el sistema utilizado en la información antecedente. El modelo hidrogeológico, como toda la cartografía asociada, fueron realizados por LEBAC con el siguiente sistema:

Projected Coordinate System: Lambert  
Projection: Lambert\_Conformal\_Conic  
False\_Easting: 0,00000000  
False\_Northing: 0,00000000  
Central\_Meridian: **-60,00000000**  
Standard\_Parallel\_1: **- 5,00000000**  
Standard\_Parallel\_2: **-42,00000000**  
Scale\_Factor: 1,00000000  
Latitude\_Of\_Origin: -32,00000000  
Linear Unit: Meter  
Geographic Coordinate System: GCS\_South\_American\_1969  
Datum: D\_South\_American\_1969  
Prime Meridian: Greenwich  
Angular Unit: Degree

Mediante este sistema se calcularon el perímetro y el área del SAG, resultando en 8384 km y 1.084.050 km<sup>2</sup>, respectivamente (Tabla I.1). Del análisis de los resultados y de las características propias de los diferentes sistemas de proyección, surgió la conveniencia de modificar ciertos parámetros de la proyección Lambert utilizada en el modelo conceptual de tal manera de que el área calculada se aproxime lo más cercanamente posible al área calculada mediante el sistema de proyección Albers Equal Area. Este sistema se trata de una proyección de tipo cónica que usa 2 paralelos estándares, produciendo mínimas distorsiones del área entre esos paralelos. En consecuencia, se estableció una nueva proyección para la modelación, denominada Lambert\_SAG4 en la Tabla I.1, utilizando paralelos de tangencia de -19 y -29 en lugar de -5 y -42 de la proyección Lambert Cónica del



modelo conceptual. Asimismo, se definió -54 como meridiano de la proyección dado que éste atraviesa el SAG aproximadamente por su parte central.

**Tabla I.1** – Comparación de sistemas de proyecciones.

<b>Sistema de proyección</b>	<b>South American Conformal Lambert Conic</b>	<b>Albers_Equal Area</b>	<b>Lambert_SAG4</b>
Perímetro (km)	8.383,67	8.827,15	8.867,35
Area (km <sup>2</sup> )	1.084.049,90	1.199.463,28	1.200.097,93
Paralelos	-5 y -42		-19 y -29
Meridiano Central	-60		-54
Datum	SAD69	SAD69	SAD69
Diferencias de áreas (km <sup>2</sup> )	-115.413,38	0,00	634,65
Diferencias de áreas (%)	-9,62	0,00	0,05

La Figura I.1 ilustra claramente las diferencias entre los tres sistemas. Tomando como patrón de comparación el área obtenida con la proyección Albers Equal Area, se aprecia que con la nueva proyección Lambert\_SAG4 resulta un área con 0.05% de error, mientras que con la Lambert original la diferencia alcanza casi el 10%.

La proyección Lambert\_SAG4 utilizada en el modelo y en la cual se presentan todos los mapas de este informe tiene las siguientes características:

Projected Coordinate System: Lambert\_SAG4

Projection: Lambert\_Conformal\_Conic

False\_Easting: 0,00000000

False\_Northing: 0,00000000

Central\_Meridian: **-54,00000000**

Standard\_Parallel\_1: **-19,00000000**

Standard\_Parallel\_2: **-29,00000000**

Scale\_Factor: 1,00000000

Latitude\_Of\_Origin: -32,00000000



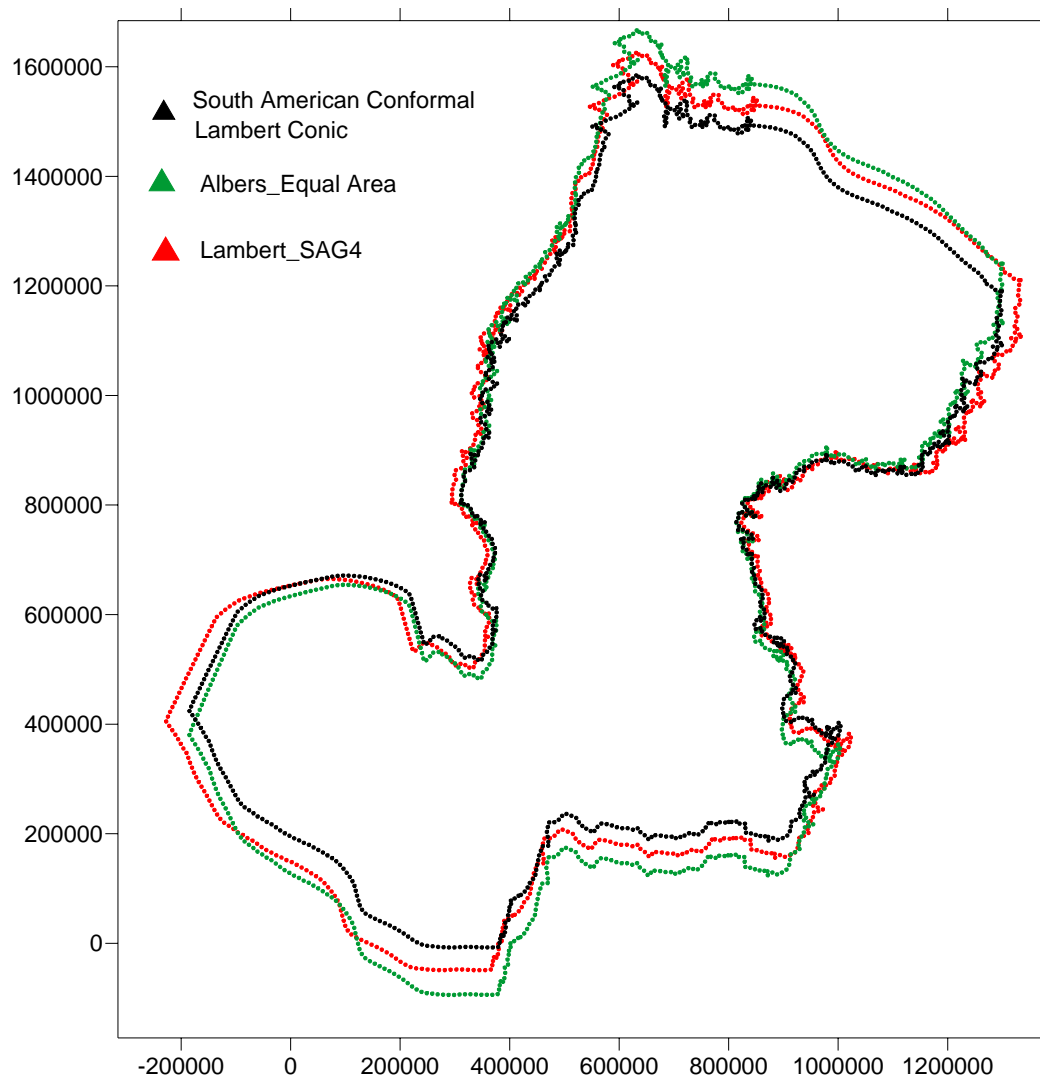
Linear Unit: Meter

Geographic Coordinate System: GCS\_South\_American\_1969

Datum: D\_South\_American\_1969

Prime Meridian: Greenwich

Angular Unit: Degree



**Figura I.1.** Comparación de sistemas de proyección (en metros). Las diferentes proyecciones están escaladas con el centro de gravedad de la proyección Lambert.



## **ANEXO II: ANALISIS DE LAS EXPLOTACIONES**

Se explican brevemente los etapas seguidas para la estimación del volumen de explotación actualizado del SAG y su correspondiente distribución geográfica, ambos componentes fundamentales del modelo numérico. Se destaca que los valores encontrados constituyen la mejor determinación posible dada la información actual disponible que pueden subestimar (no todos los pozos en funcionamiento están catastrados) o sobreestimar la explotación (algunos de los pozos catastrados pueden no estar operativos o funcionar con caudales menores a los consignados al momento de la construcción del pozo).

### **II.1. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

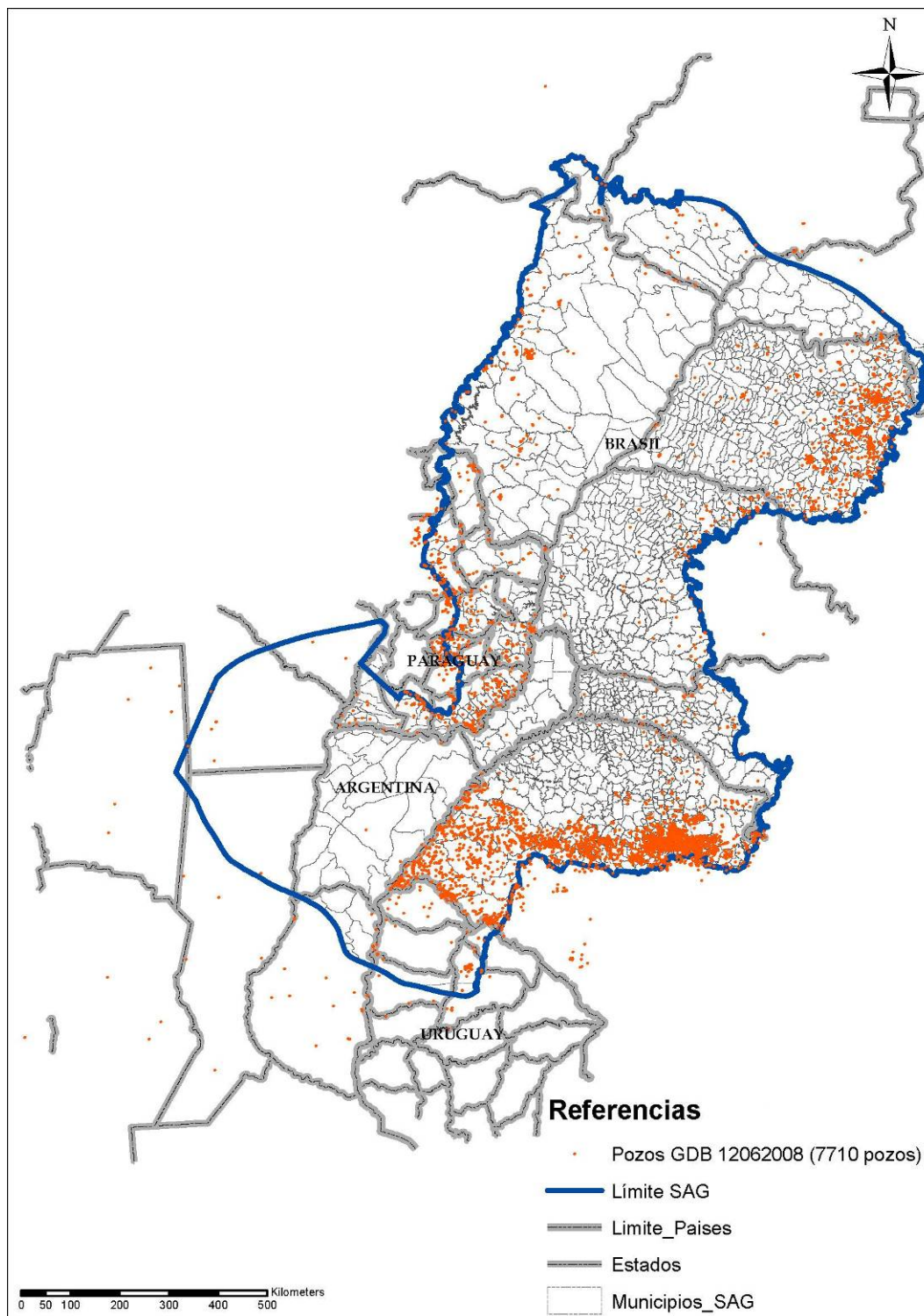
Se realizó el gerenciamiento de información proveniente de diferentes fuentes, según se explica más abajo, poniendo especial énfasis en los datos de pozos. Dado que el objetivo era estimar un valor de la explotación actual del SAG, se aplicaron varios criterios de selección de la información basados en: a) la ubicación del pozo dentro de los límites del SAG, b) la formación que se explota, y 3) la disponibilidad de información sobre el caudal de extracción. Donde fue posible, se clasificó la explotación de acuerdo al volumen de extracción en cada pozo, al año de construcción y al país.

### **II.2. FUENTES DE INFORMACIÓN**

Se dispuso de la base de datos proporcionada por la Secretaría del Acuífero Guaraní en formato Access de Microsoft (\*.mdb), denominada GDB12062008, de aquí en adelante llamada GDB. Esta base contiene información de 7710 pozos (Figura II.1) debidamente identificados y georreferenciados en latitud y longitud, referidos al sistema geográfico de coordenadas GCS\_South\_American\_1969, con paralelos de tangencia ubicados en -5° y -42°.

Además de la base de datos, se utilizó como apoyo para el análisis la información geográfica en formato digital proveniente de la Secretaría General y de la información hidrogeológica entregada por el Dr. Didier Gastmans del LEBAC.





**Figura II.1.** Pozos de la base de datos denominada GDB12062008 (GDB).





En todas las bases utilizadas para la creación de la base final empleada en el modelo numérico regional del SAG, como en los mapas digitales, fue necesario convertir las coordenadas geográficas de los pozos y mapas al sistema de proyección adoptado, explicado en el Anexo I, definido especialmente para la modelación:

Projected Coordinate System: Lambert\_SAG4  
Projection: Lambert\_Conformal\_Conic  
False\_Easting: 0,00000000  
False\_Northing: 0,00000000  
Central\_Meridian: -54,00000000  
Standard\_Parallel\_1: -19,00000000  
Standard\_Parallel\_2: -29,00000000  
Scale\_Factor: 1,00000000  
Latitude\_Of\_Origin: -32,00000000  
Linear Unit: Meter  
Geographic Coordinate System: GCS\_South\_American\_1969  
Datum: D\_South\_American\_1969  
Prime Meridian: Greenwich  
Angular Unit: Degree

### II.3. ZONIFICACIONES DE LAS EXPLOTACIONES

Las tareas realizadas para la zonificación de las explotaciones son las siguientes:

1. Visualización de la información de base de datos. Para la base GDB fue preciso unir las tablas *Pozoinformacion* y *Ubicación*, aplicando herramientas del ArcGIS 9.2, a través de un campo en común, *IdUbicacion*, lo cual conformó una nueva tabla denominada *Pozos GDB 12062008* (Figura II.1), con 7710 pozos registrados con datos de localización (país, provincia, localidad, paraje, etc.)
2. Homologación de las coordenadas geográficas originales de los pozos de cada base consultada.
3. Conversión de las coordenadas geográficas de los pozos al sistema de coordenadas definidas para la modelación regional del SAG.



4. Aplicación del primer filtro: control y verificación de ubicación de los pozos dentro de los límites municipales, los cuales fueron extraídos de páginas oficiales en la web de cada país en formato SHP, todas estas referidas al sistema geográfico de coordenadas GCS\_South\_American\_1969. Reducción de 7710 a 6875 pozos.
5. Reubicación de pozos mal situados, encontrados fuera de los límites físicos de país, provincia, departamento y municipio, con apoyo del software Google Earth, georeferenciación de dichos pozos en coordenadas geográficas y conversión al sistema definido para el modelo del SAG.
6. Control de datos de profundidad, caudal y cota, que permitió identificar pozos duplicados en la unión de estas bases.
7. Aplicación del segundo filtro: selección de pozos de la tabla *Pozos GDB 12062008* de acuerdo a la litología utilizando las características que se definen en la columna "ACUIFERO" de la GDB para lo cual se seleccionaron sólo aquellos que pertenecieran a: SAG, Serra Geral/SAG, Piramboia, Misiones, SAG/Intrusiva, SAG/Permiano, y S/D. En esta última categorización se encuentran los pozos pertenecientes al Corredor Termal del Río Uruguay. Reducción de 6875 a 6625 pozos.
8. Aplicación del tercer filtro: selección de pozos que tuvieran las características antes definidas en la columna "ACUIFERO" y que la columna "CAUDAL" no fuera nula. Los datos de la columna CAUDAL están expresados en m<sup>3</sup>/h. Reducción de 6625 a 1874 pozos.
9. Consulta de otras bases: Estudio PROTEÇÃO AMBIENTAL E GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL INTEGRADO DO AQUÍFERO GUARANI-USO ATUAL E POTENCIAL DO AQUÍFERO GUARANI – BRASIL - Anexo 2 – Relação de poços em atividade do Sistema Aquífero Guaraní. Dr. Chang, Hung Kiang UNESP/IGCE Marzo de 2001. Este trabajo contiene 930 pozos de los cuales solo 801 poseen datos de caudal (m<sup>3</sup>/h). Con los datos de caudal seleccionados en el anterior paso, se verificó que pozos que están en la base GDB con caudal nulo, en el estudio del Dr Chang si poseen caudal y operatividad. Sólo se detectaron 45 pozos en esta condición que fueron agregados al grupo de 1874 pozos de la anterior base mencionada.
10. Consulta de otras bases: Proyecto del Fondo de Universidades denominado "Desarrollo metodológico para la evaluación de la recarga y vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní", Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo



de las formaciones Tacuarembó –Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay”. De este estudio se identificaron 99 pozos con datos de caudal, expresados en  $\text{m}^3/\text{d}$ , los cuales están referenciados al sistema de coordenadas UTM, zona 21 s, los cuales fueron convertidos al sistema definido por el SAG.

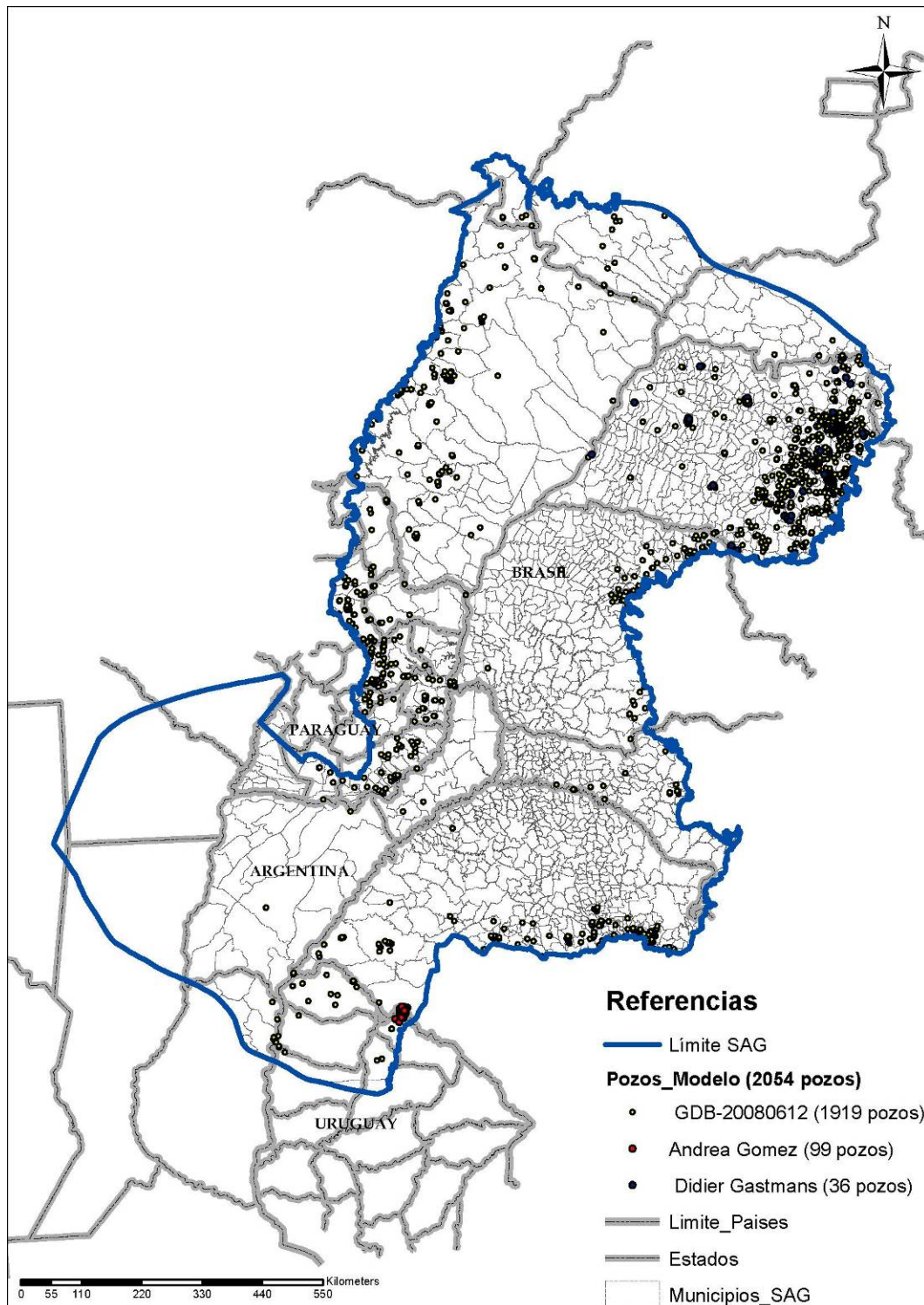
11. Consulta de otras bases: estudio realizado sobre el uso y explotación del recurso por parte de los municipios en el Estado de Sao Paulo, Brasil, entregado por el Dr. Didier Gastmans. Dicha base contiene datos del Dr Chang que existen en GDB. Con un total de 834 pozos que están referenciados a UTM, 436 pozos en la zona 23s MC 45 y 382 pozos zona 22s MC 51, los cuales debieron ser convertidos al sistema de coordenadas del SAG. De este estudio solo se aprovecharon 36 pozos, ya que estos no estaban duplicados.
12. La unión de GDB más las fuentes anteriores mencionadas y conformación de una base con 2054 pozos con caudal que son los empleados en el proceso de modelación regional del SAG (Figura II.2).

Es importante aclarar que la versión actual de la base de datos del proyecto incluye todos los pozos que fueron adicionados de otras fuentes en los pasos 9, 10 y 11.

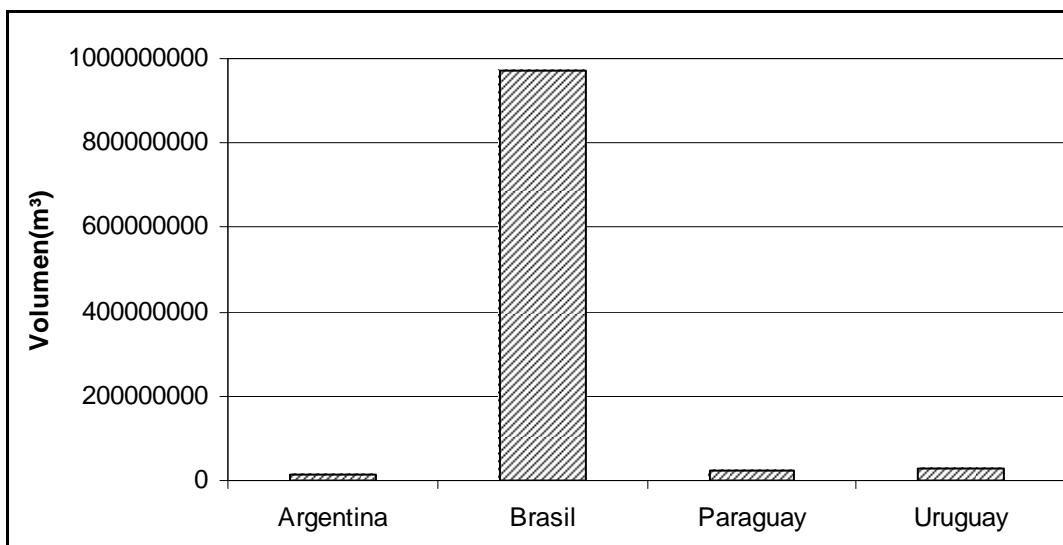
A partir de la selección de 2054 pozos de explotación se analizó el volumen anual de extracción por país (Tabla II.1 y Figura II.3) y el número de pozos de acuerdo al caudal de explotación (Tabla II.2 y Figura II.4). Para este cálculo se supuso que los pozos operan 18 horas diarias. El volumen diario total resultó  $2.847.013,47 \text{ m}^3$ , que corresponde a un volumen anual de  $1040 \text{ hm}^3$ .

**Tabla II.1.** Volumen total anual de explotación por país.

<b>País</b>	<b>Volumen total (<math>\text{m}^3</math>)</b>
Argentina	13.421.524,5
Brasil	973.032.362,9
Paraguay	22.937.184,0
Uruguay	29.735.995,2



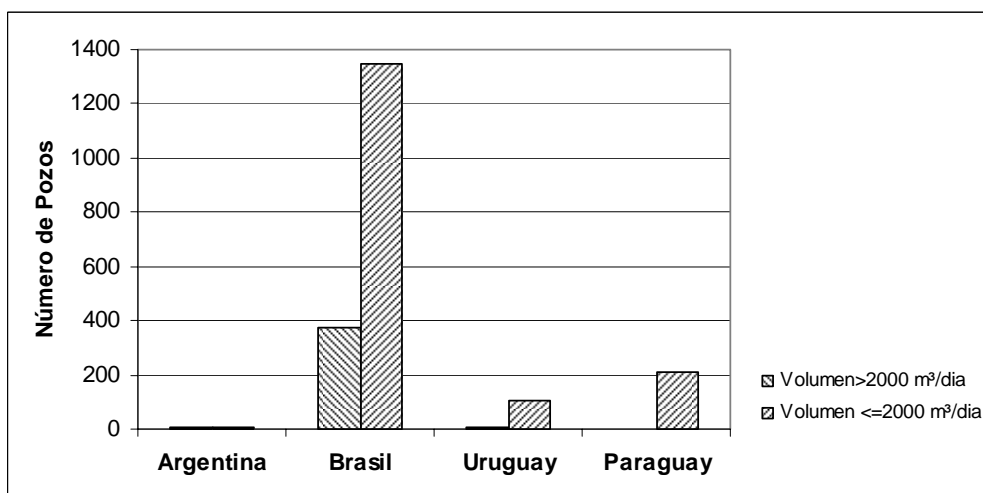
**Figura II.2.** Pozos seleccionados para incluir en la modelación regional del SAG.



**Figura II.3.** Volumen total anual de explotación por país.

**Tabla II.2.** Número de pozos por país y por rango de explotación.

País	Volumen >2000 m <sup>3</sup> /d	Volumen <=2000 m <sup>3</sup> /d
Argentina	4	4
Brasil	374	1348
Uruguay	9	106
Paraguay		210



**Figura II.4.** Número de pozos por país y por rango de explotación.



Se intentó un análisis basado en el periodo de construcción de los 2054 pozos con el fin de identificar una curva de crecimiento de la explotación para asociarla al crecimiento de la población, y con ella poder realizar inferencia futuras de uso. Lamentablemente sólo 314 pozos (15 %) poseen dicha información. No obstante, en las Figuras II.5 y II.6 se presentan, por rangos de años de construcción, el número de pozos y los volúmenes diarios de explotación.

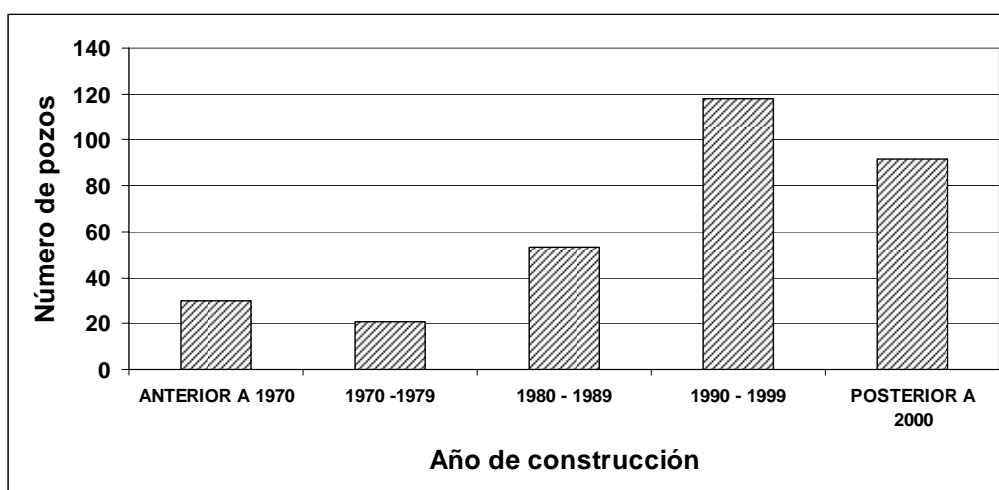


Figura II.5. Número de pozos por año de construcción, por rangos.

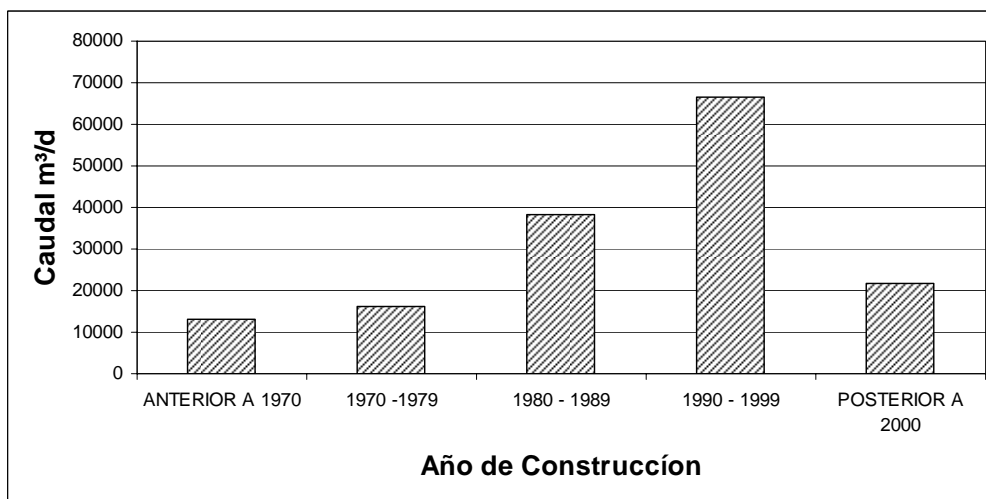


Figura II.6. Volumen total diario de extracción por año de entrada en funcionamiento, por rangos.

Este análisis sólo debe considerarse aproximado aunque puede pensarse que los 314 pozos constituyen una muestra del total a partir de la cual inferir el crecimiento aproximado de las explotaciones. De las figuras surge que habría una





tendencia creciente en el número de pozos hasta la década del 90, para disminuir posteriormente. El número de pozos más recientes no se condice con un menor caudal de explotación, a pesar que las técnicas de construcción de los pozos son más modernas y deberían obtenerse mayores rendimientos. Asimismo, el número de pozos censados a partir del año 2000 son pocos, previsiblemente porque no se dispone de información de caudales.

Finalmente, se definieron 20 zonas de explotación para el modelo según el criterio de explotación y de situación, ver Figura II.7.

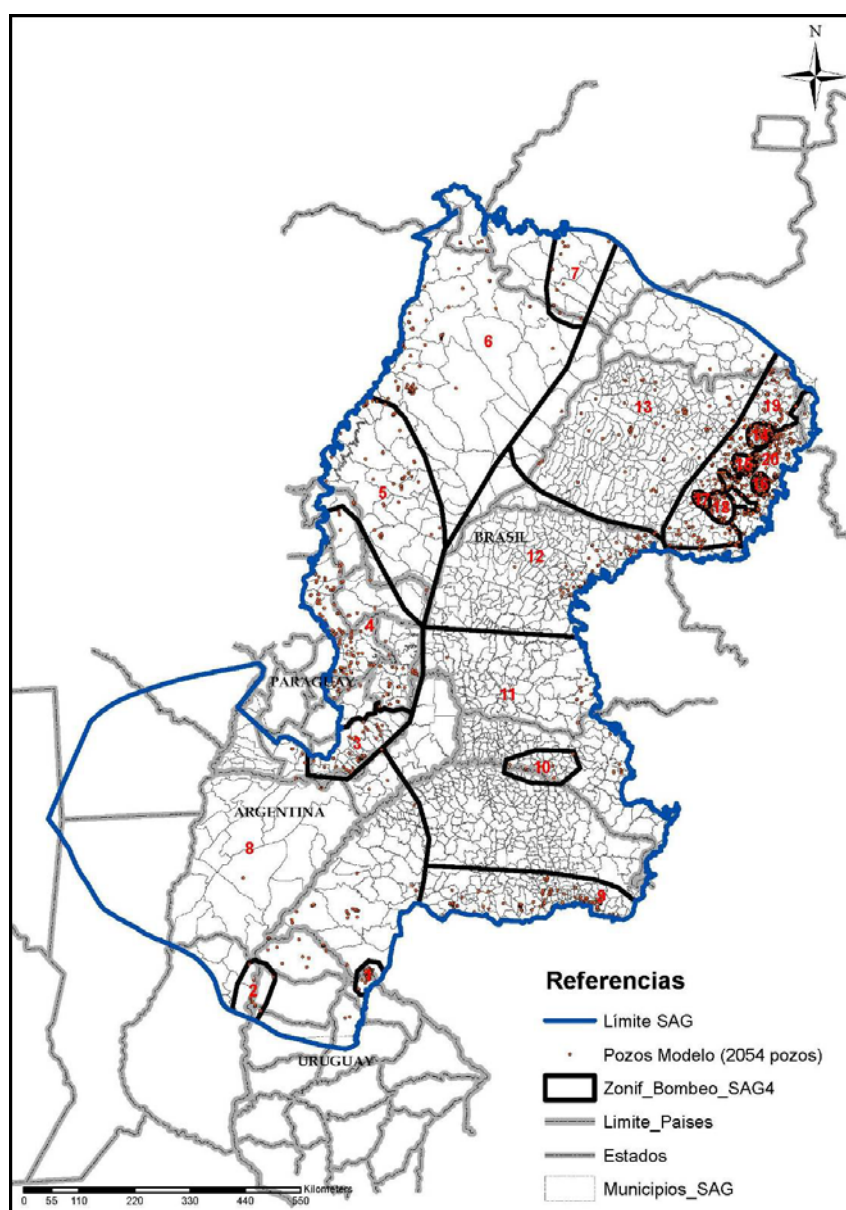
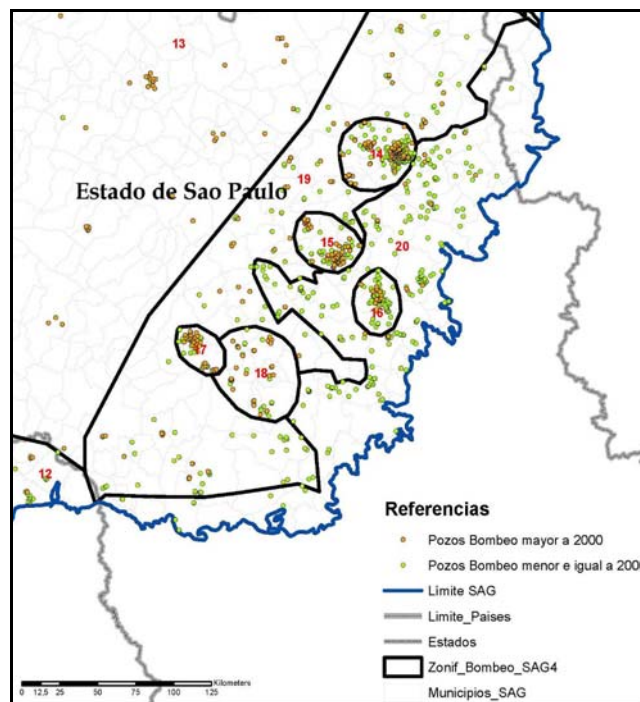


Figura II.7. Zonificación de la extracción de agua del Acuífero Guaraní.

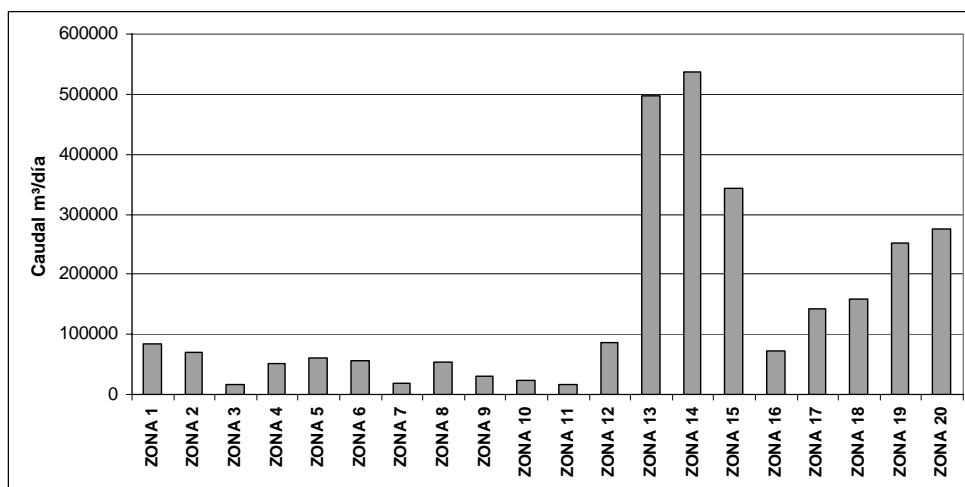


La Figura II.8 presenta un detalle de la zonificación de las zonas de explotación en el Estado de São Paulo, donde se encuentran los municipios Ribeirão Preto, Sertãozinho, São Carlos, Bauru, Descalvado y Araraquara con las mayores concentraciones de extracciones y pozos.



**Figura II.8.** Detalle de la zonificación en el Estado de São Paulo, donde se concentra el mayor numero de pozos de explotación y el mayor volumen de extracción.

En la Figura II.9 y Tabla II.3 se presentan los volúmenes diarios y el número de pozos para cada zona de explotación.



**Figura II.9.** Volumen diario de explotación por zona de bombeo.





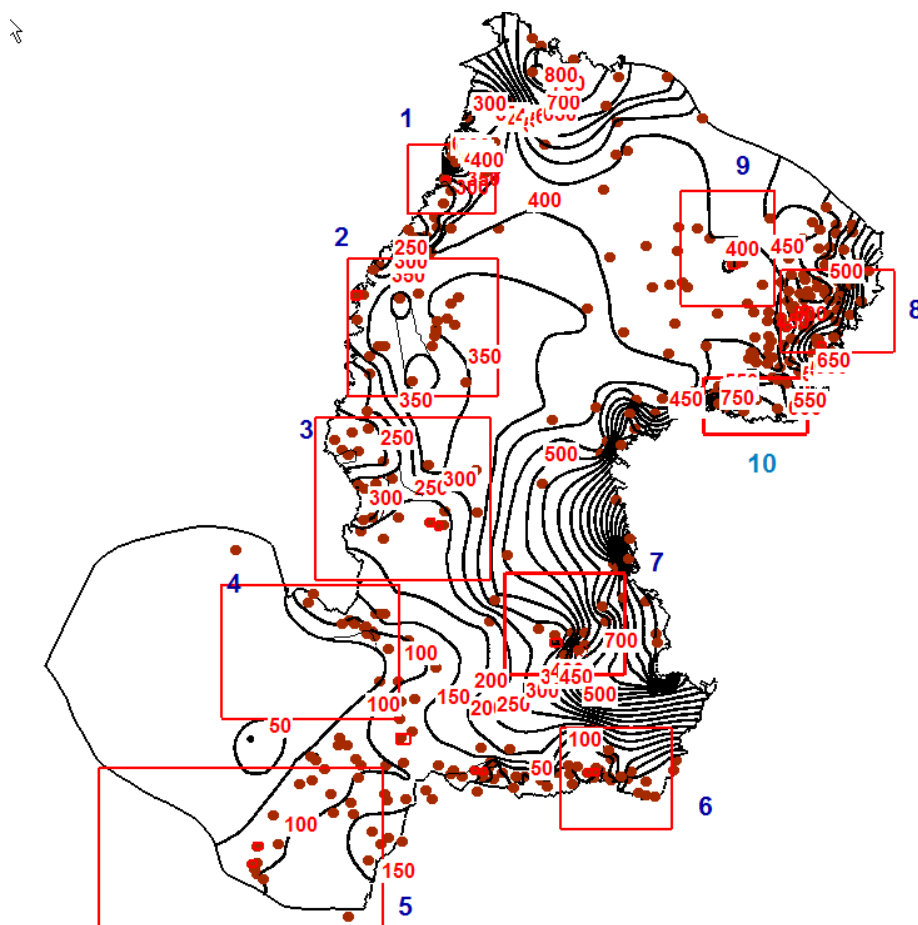
**Tabla II.3.** Volumen diario y número de pozos para cada zona de explotación.

<b>Zona</b>	<b>Volumen diario (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Número de pozos</b>
1	84.450,78	144
2	69.066	12
3	16.180,2	49
4	50.908,32	158
5	61.305,66	76
6	56.653,11	96
7	17.676,36	16
8	54.351,36	71
9	30.976,74	160
10	23.014,8	9
11	16.956,9	23
12	86.176,26	75
13	497.013,84	78
14	537.272,82	309
15	344.090,52	133
16	73.407,24	96
17	141.355,26	78
18	158.258,7	45
19	252.500,04	181
20	275.308,56	245



### ANEXO III: ANÁLISIS DE LA PIEZOMETRÍA

LEBAC utilizó 368 puntos de nivel de agua para la construcción de las curvas piezométricas (Figura III.1). Los mismos puntos o un grupo seleccionado de ellos, deben incluirse en el modelo numérico como puntos de observación para realizar la calibración automática del modelo. La presencia de unas pocas medidas muy inciertas, o al menos dudosas, pueden tener una gran influencia en el valor de la función objetivo, y por ende en el error medio resultante de la calibración. Por ello se analizó cuidadosamente la consistencia entre los valores medidos y el trazado de las curvas piezométricas, y entre los valores medidos y sus vecinos, con el fin de identificar posibles "outliers" o valores medidos no consistentes. Toda vez que se detectó un punto de observación de este tipo se analizó información suplementaria como la estratigrafía para valorar la calidad de la información y de ser necesario se redujo su confiabilidad en las medidas dudosas o directamente se las eliminó.



**Figura III.1.** Ubicación de pozos de observación de niveles piezométricos y curvas piezométricas  
Localización de zonas de detalle para el análisis de información.



Para facilitar el análisis de la información se identificaron 10 zonas de detalle (Figuras III.2 y III.3). Se detectó que algunos puntos observados fueron desechados al momento de confeccionar las curvas por no guardar consistencia con el patrón piezométrico del entorno (ver cuadros 1 y 3, Figura III.2). En otros casos las curvas admiten trazas alternativas según se interprete la información (ver curvas de trazos más fino en los cuadros 2 y 4, Figura III.2).

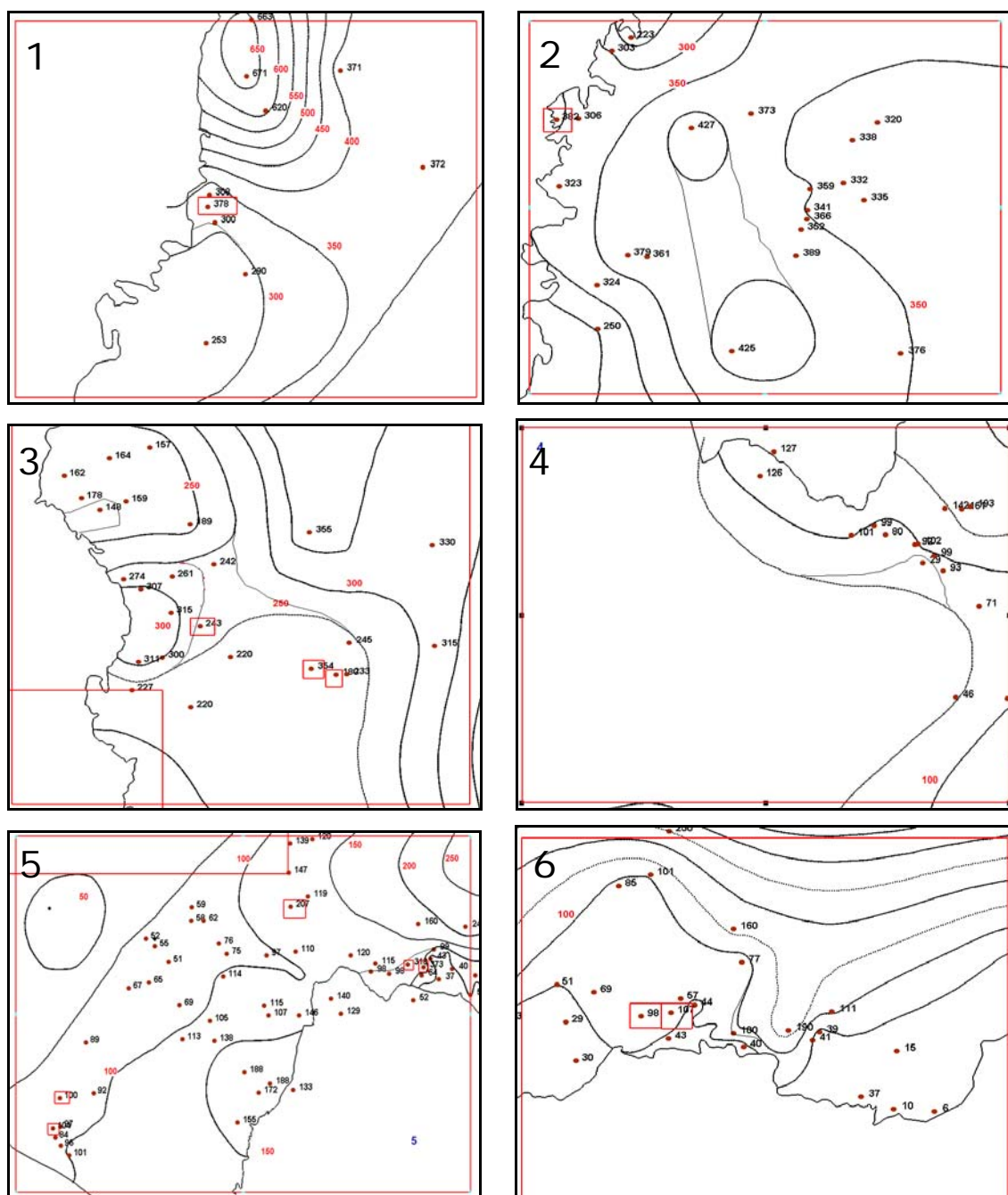
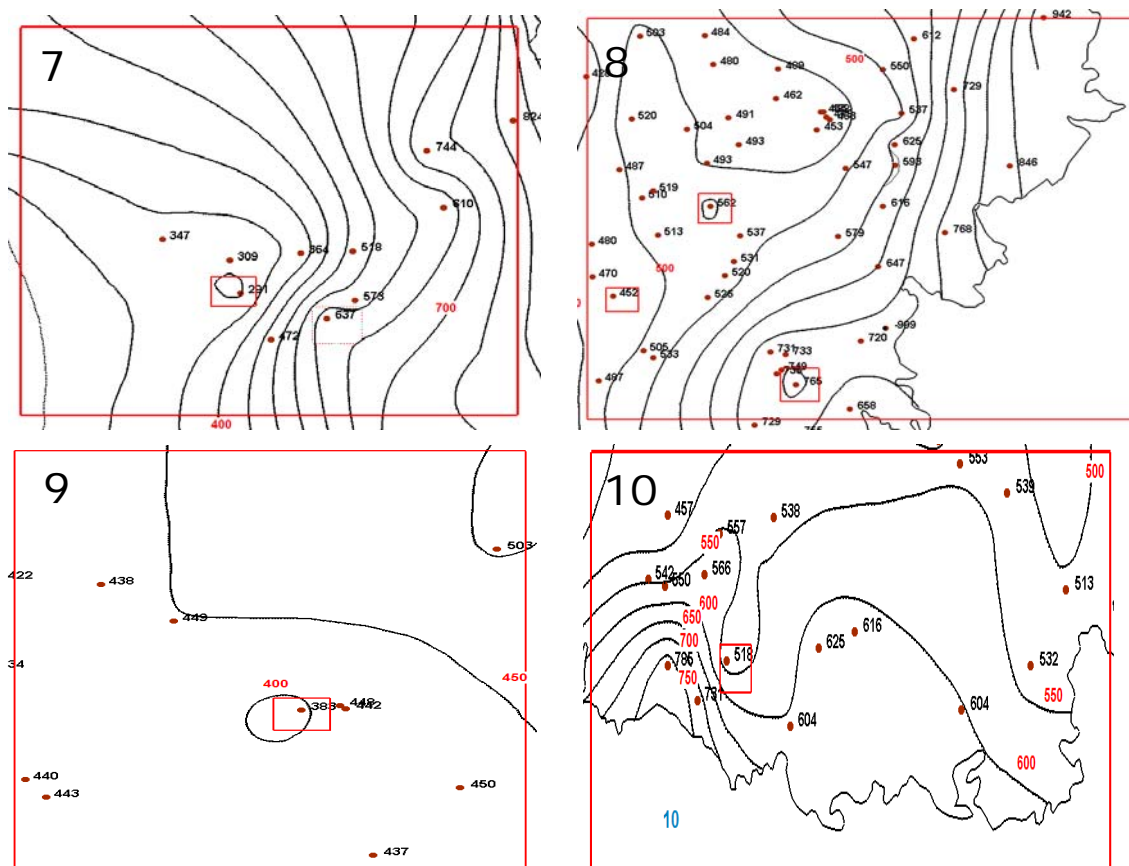


Figura III.2. Zonas de detalle para el análisis de información piezométrica.



**Figura III.3.** Zonas de detalle para el análisis de información piezométrica.

Finalmente, en un trabajo conjunto con el Dr. Didier Gatsman, se seleccionaron 114 del universo inicial de 368 (Figura 5.10), conjunto de puntos de observación utilizados en la calibración.



## ANEXO IV: PARAMETROS CALCULADOS, PIEZOMETRIA, NIVELES Y BALANCE DE MASAS

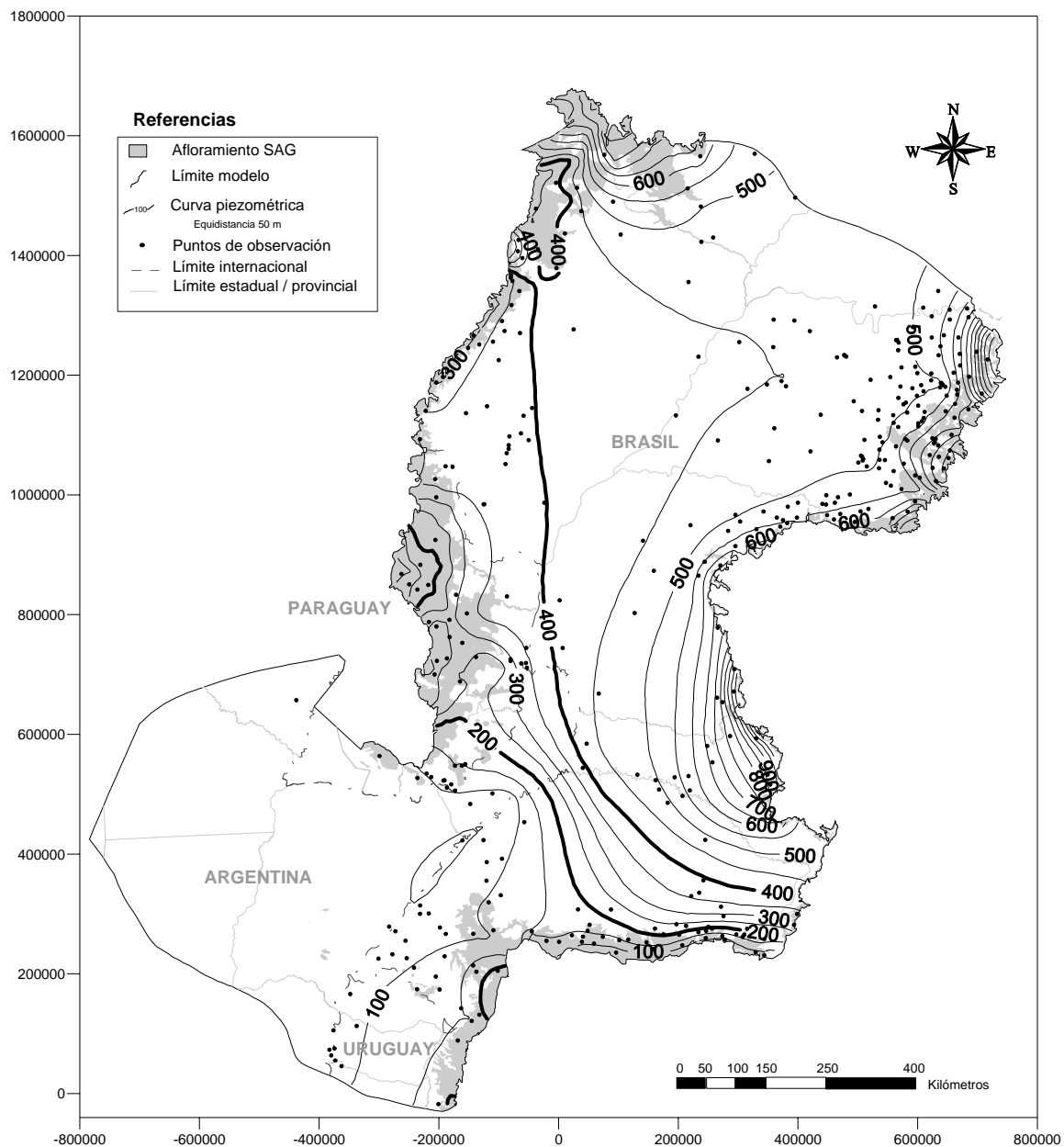
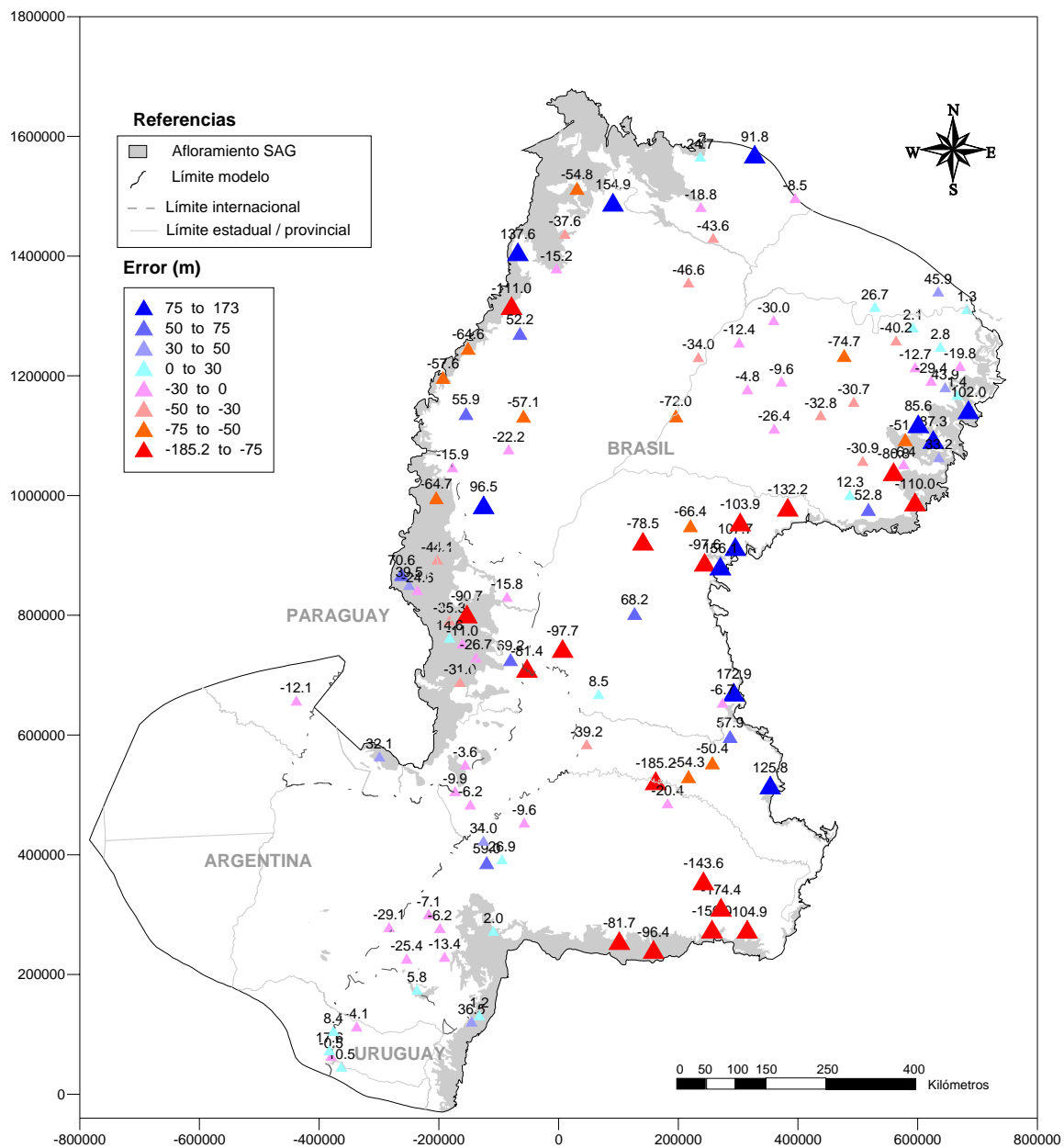


Figura IV.1 – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 1.



**Figura IV.2** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 1. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.

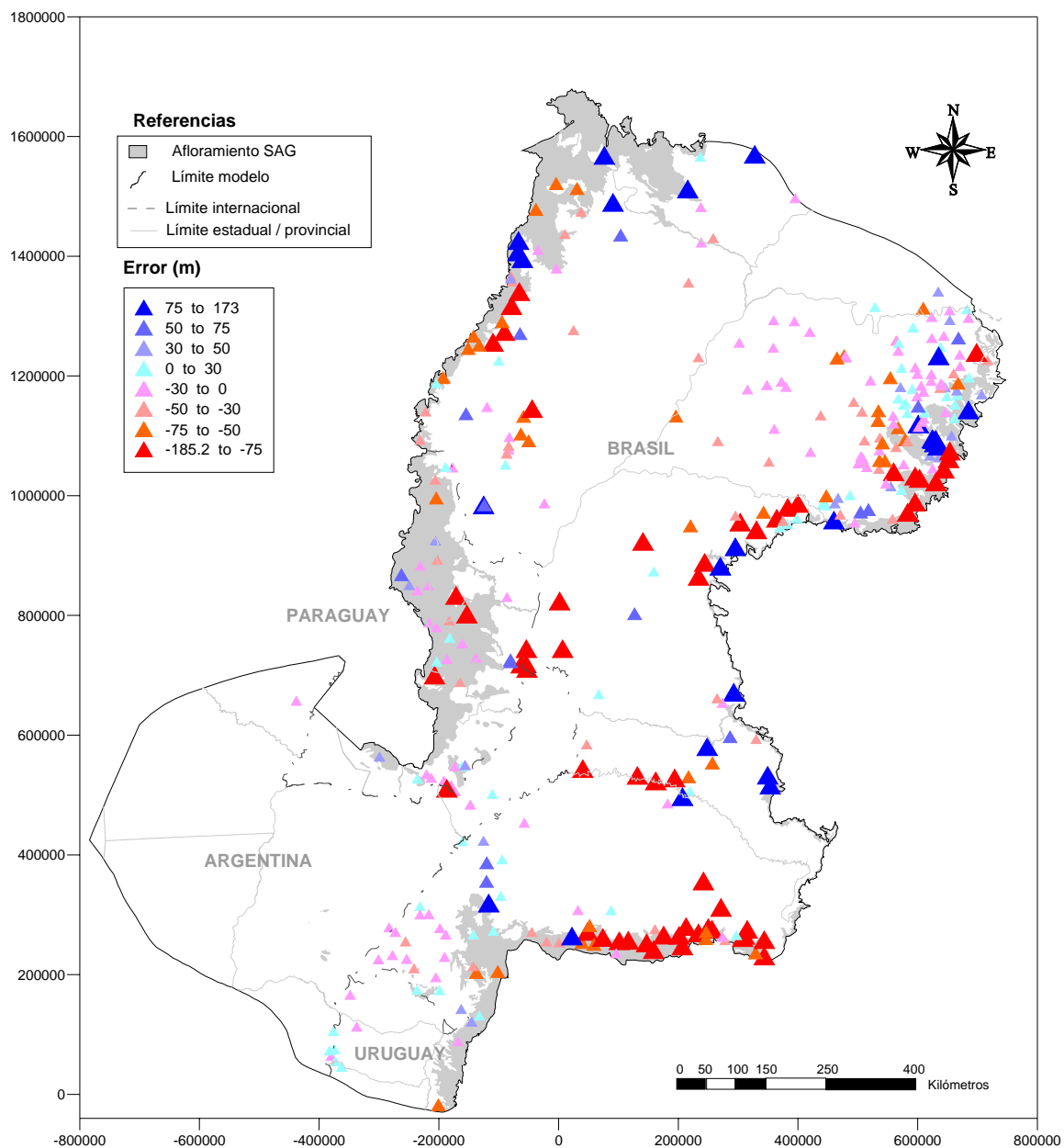
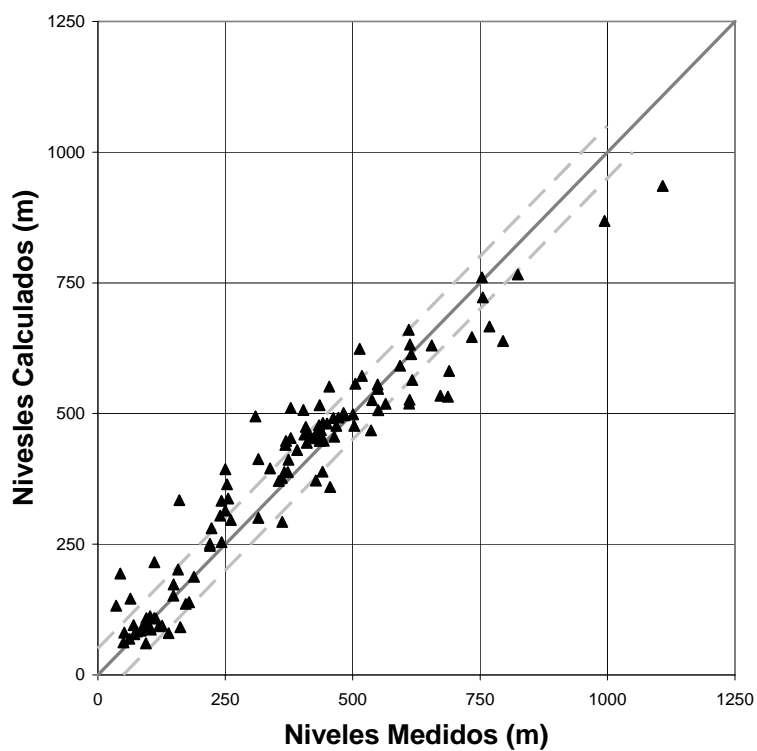
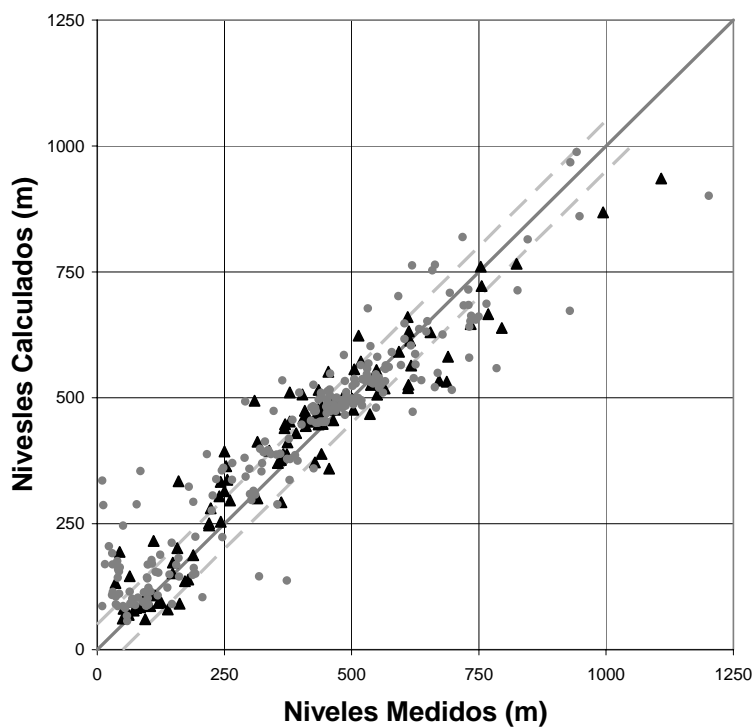


Figura IV.3 – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 1. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.4** – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 1.



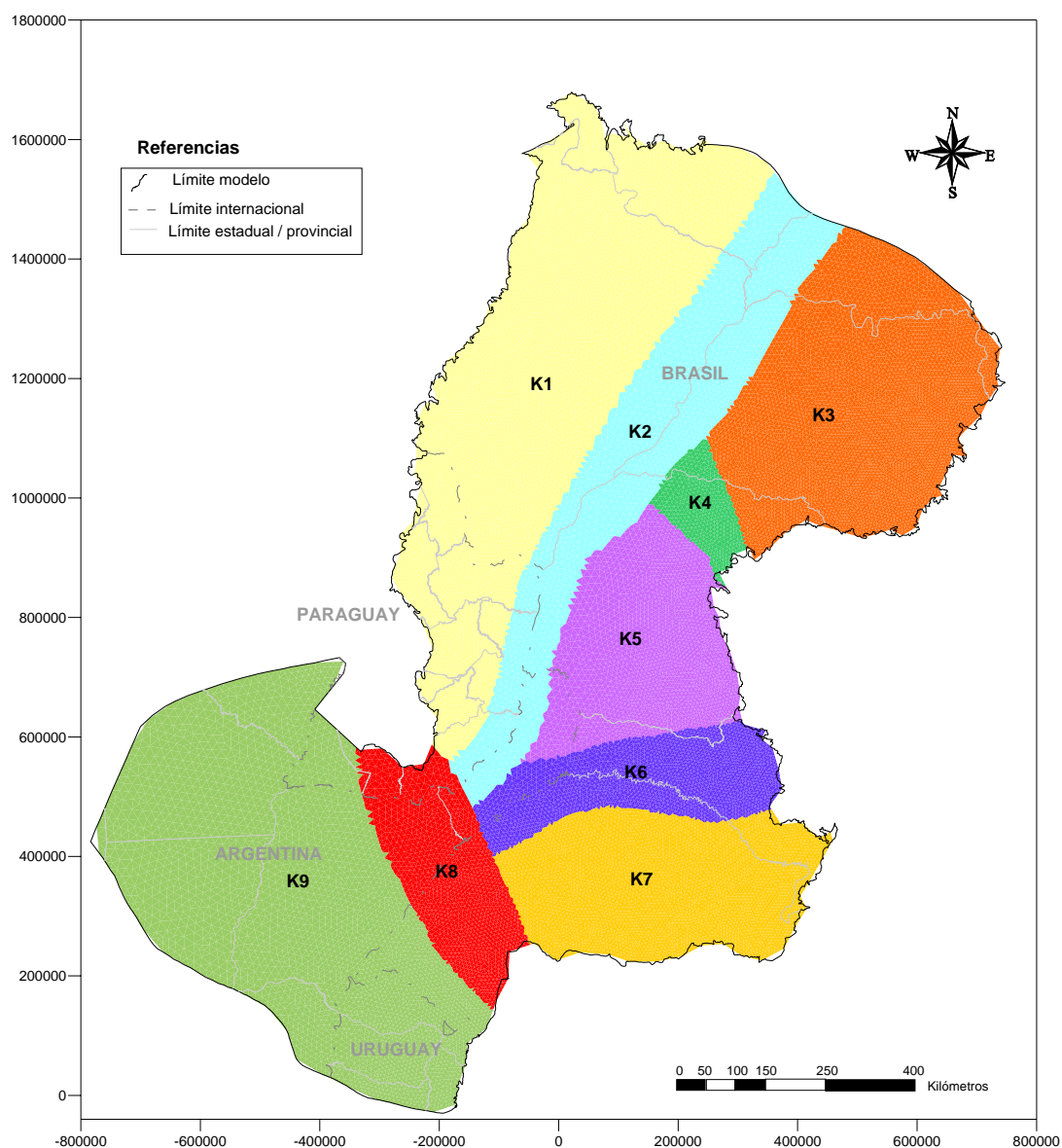
**Figura IV.5** – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 1.





**Tabla IV.1** – Balance de masas, Escenario 1. Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.

Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3757840	43.5			-84452	-1.0	111915	1.3
2	128072	1.5			-69066	-0.8	-243563	-2.8
3	265171	3.1			-16180	-0.2	763901	8.8
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-111966	-1.3
5	96242	1.1			-61305	-0.7	24814	0.3
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-392991	-4.5
7	130836	1.5			-17677	-0.2	-624817	-7.2
8	828324	9.6			-54350	-0.6	-414374	-4.8
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	-647069	-7.5
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-283073	-3.3
11	204625	2.4			-16957	-0.2	1152	0.0
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-294143	-3.4
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-326104	-3.8
14	0	0.0			-537286	-6.2	-389987	-4.5
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-222546	-2.6
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-139967	-1.6
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-304794	-3.5
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-438216	-5.1
19	20131	0.2			-251701	-2.9	29841	0.3
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-102519	-1.2
21					654068	7.6	-848784	-9.8
22					1176010	13.6	-53180	-0.6
23							-36488	-0.4
24							-350934	-4.1
25							-141039	-1.6
26							-817883	-9.5
27							-75289	-0.9
28							-182662	-2.1
29							-409974	-4.7
30							-568436	-6.6
31							-120571	-1.4
32							-6108	-0.1
33							-955120	-11.1
34			-71595	-0.8				
35			-72661	-0.8				
36			-178525	-2.1				
<b>TOTALES</b>	<b>9766465</b>	<b>113</b>	<b>-322781</b>	<b>-4</b>	<b>-1015904</b>	<b>-12</b>	<b>-8570973</b>	<b>-99</b>



**Figura IV.6 – Zonificación de la conductividad hidráulica, Escenario 2.**

**Tabla IV.1 – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 2.**

Zona	K (m/d)
1	12.95
2	16.12
3	7.20
4	2.28
5	5.54
6	3.27
7	17.16
8	5.52
9	11.39

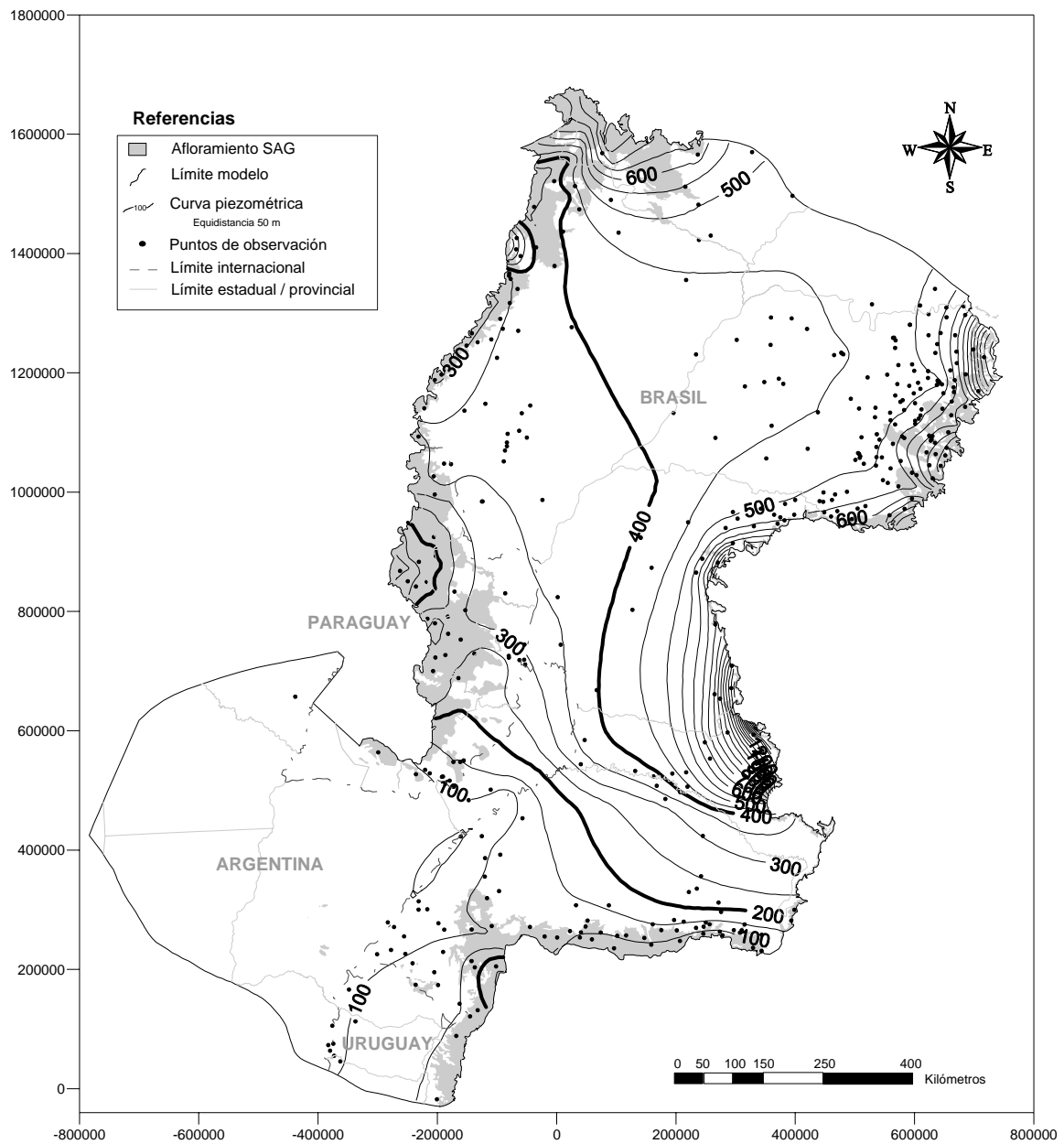
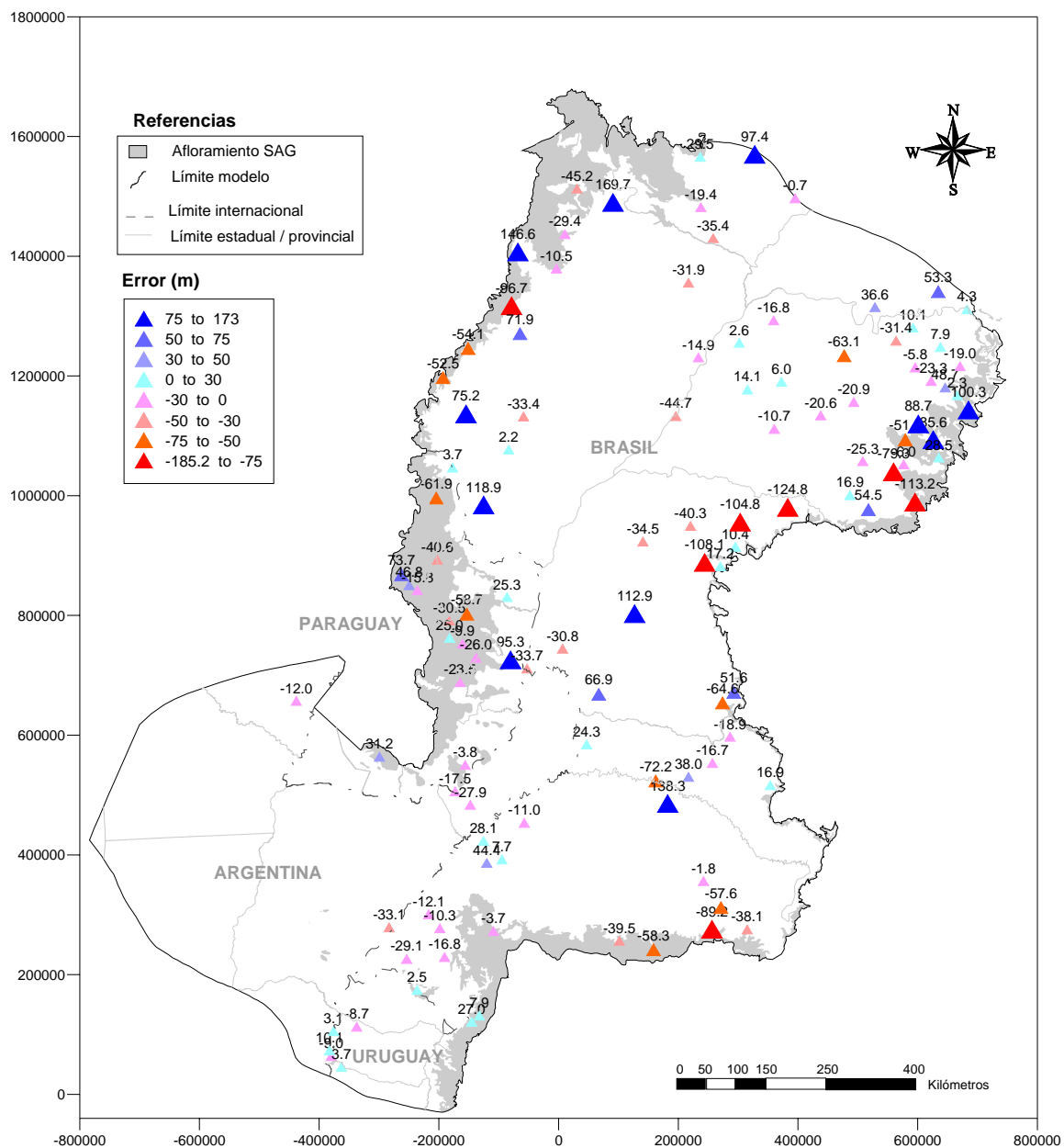
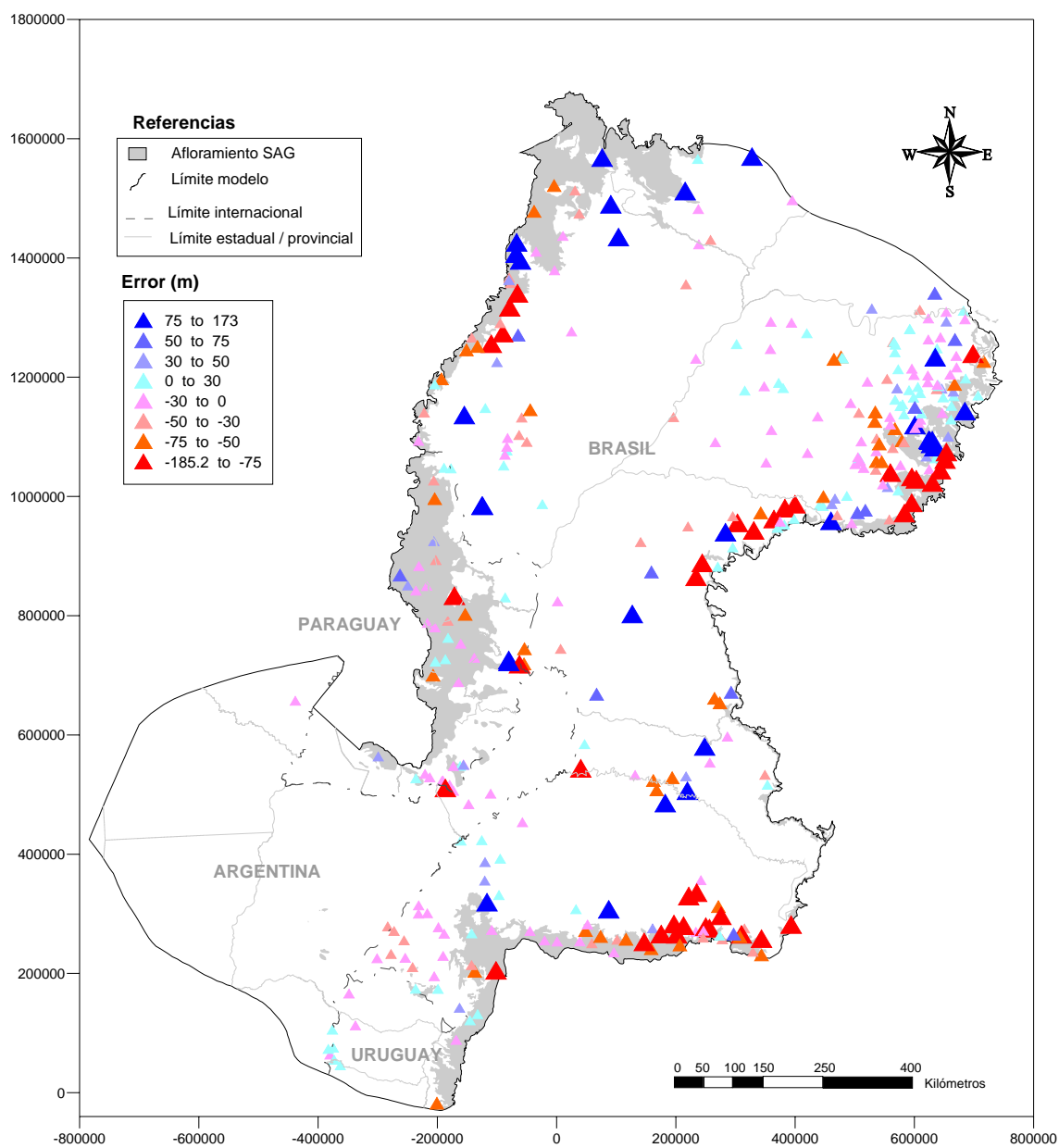


Figura IV.7 – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 2.



**Figura IV.8** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 2. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.9** – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 2. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.

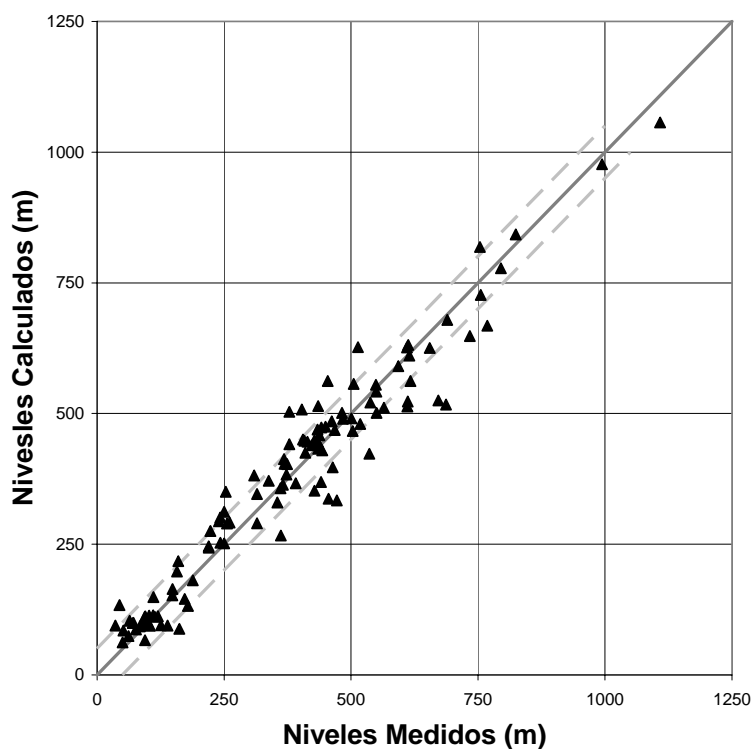


Figura IV.10 – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 2.

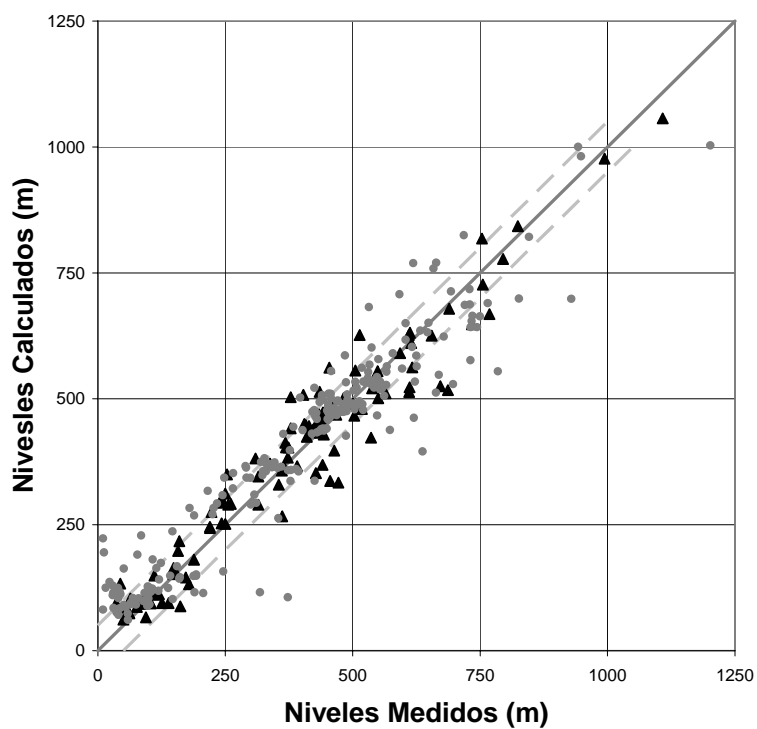


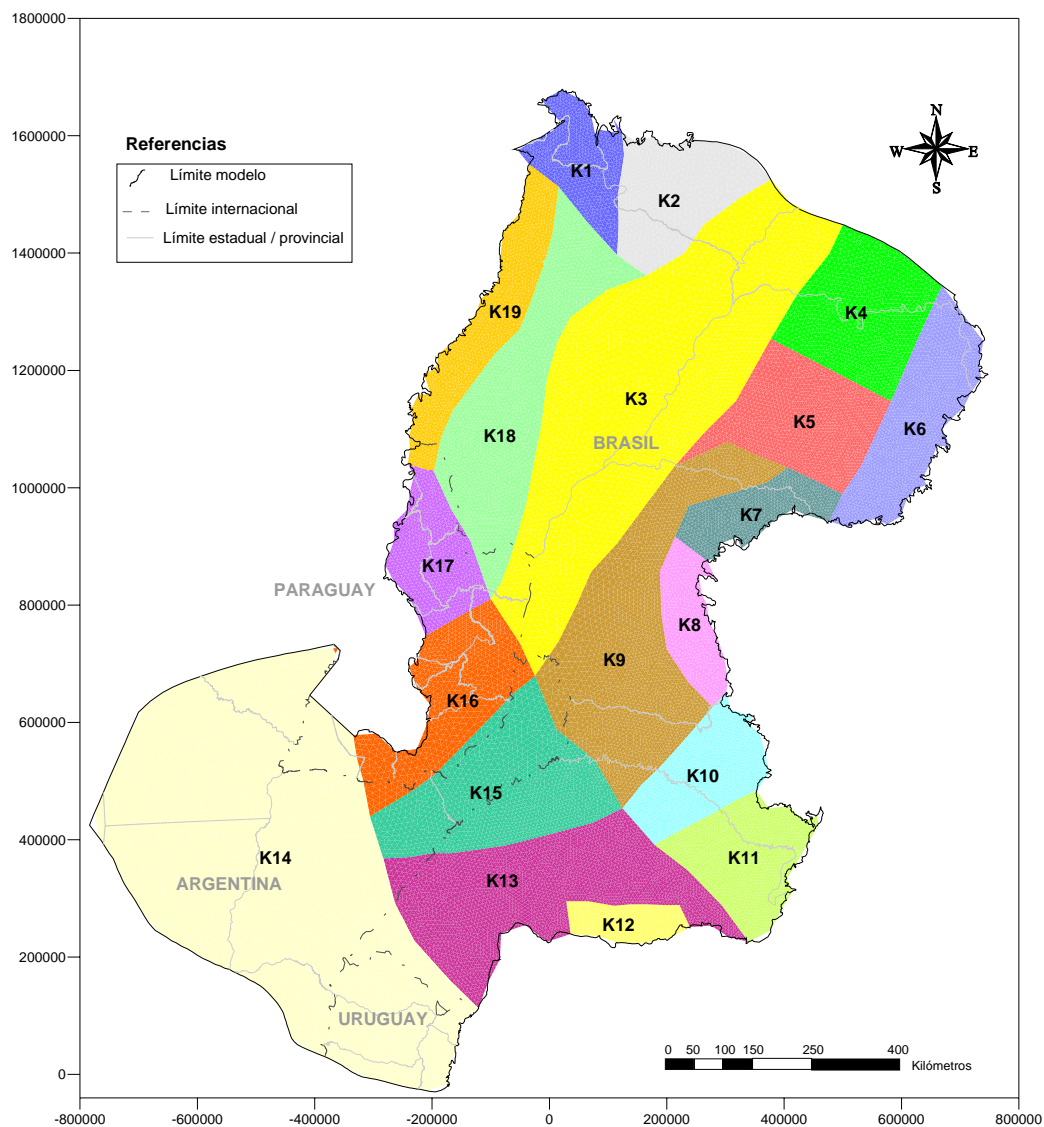
Figura IV.11 – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 2.



**Tabla IV.3 – Balance de masas, Escenario 2.** Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.

Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3756840	43.5			-84452	-1.0	183415	2.1
2	128072	1.5			-69066	-0.8	-16844	-0.2
3	265171	3.1			-16180	-0.2	1308630	15.1
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-94737	-1.1
5	96242	1.1			-61305	-0.7	115283	1.3
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-419209	-4.9
7	130836	1.5			-17677	-0.2	-909372	-10.5
8	828324	9.6			-54350	-0.6	-555831	-6.4
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	-845293	-9.8
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-335063	-3.9
11	204625	2.4			-16957	-0.2	139705	1.6
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-343682	-4.0
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-357945	-4.1
14	0	0.0			-537286	-6.2	-525666	-6.1
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-263069	-3.0
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-160733	-1.9
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-207722	-2.4
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-529571	-6.1
19	20131	0.2			-251701	-2.9	17280	0.2
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-158465	-1.8
21					653999	7.6	-663319	-7.7
22					1175910	13.6	-37073	-0.4
23							-14321	-0.2
24							-343287	-4.0
25							-140022	-1.6
26							-801694	-9.3
27							-58875	-0.7
28							-179586	-2.1
29							-406366	-4.7
30							-708621	-8.2
31							-92815	-1.1
32							-29859	-0.3
33							-1162540	-13.5
34			180900	2.1				
35			-97048	-1.1				
36			-235981	-2.7				
<b>TOTALES</b>	<b>9765465</b>	<b>113.0</b>	<b>-152129</b>	<b>-1.8</b>	<b>-1016073</b>	<b>-11.8</b>	<b>-8597267</b>	<b>-99.5</b>





**Figura IV.12 – Zonificación de la conductividad hidráulica, Escenario 3.**

**Tabla IV.4 – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 3.**

Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)
1	5.77	11	3.52
2	11.36	12	255.09
3	28.76	13	12.71
4	3.68	14	21.49
5	4.2	15	3.32
6	7.67	16	32.38
7	3.1	17	10.96
8	3.98	18	4.08
9	11.17	19	8.96
10	4.59		

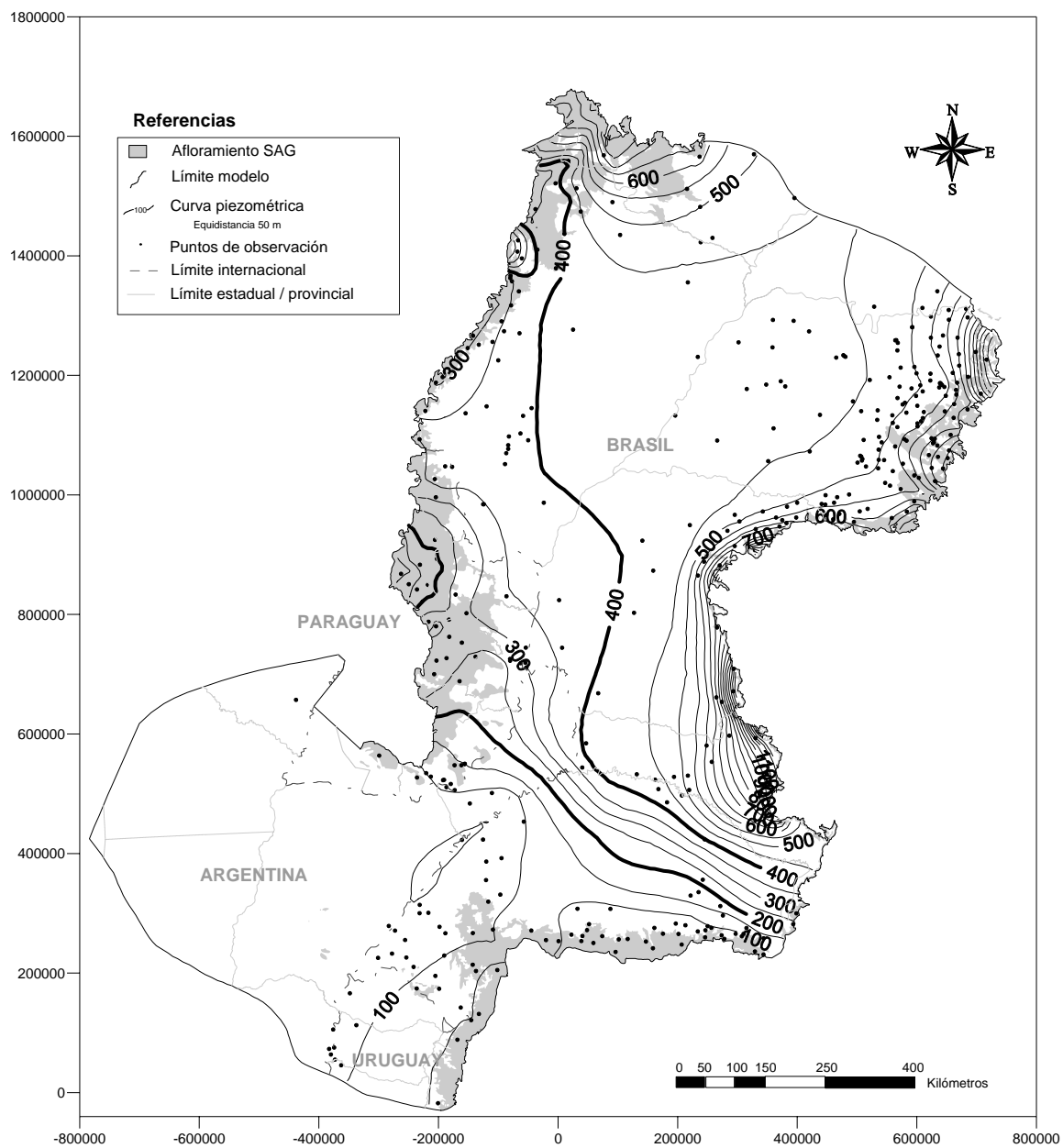


Figura IV.13 – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 3.

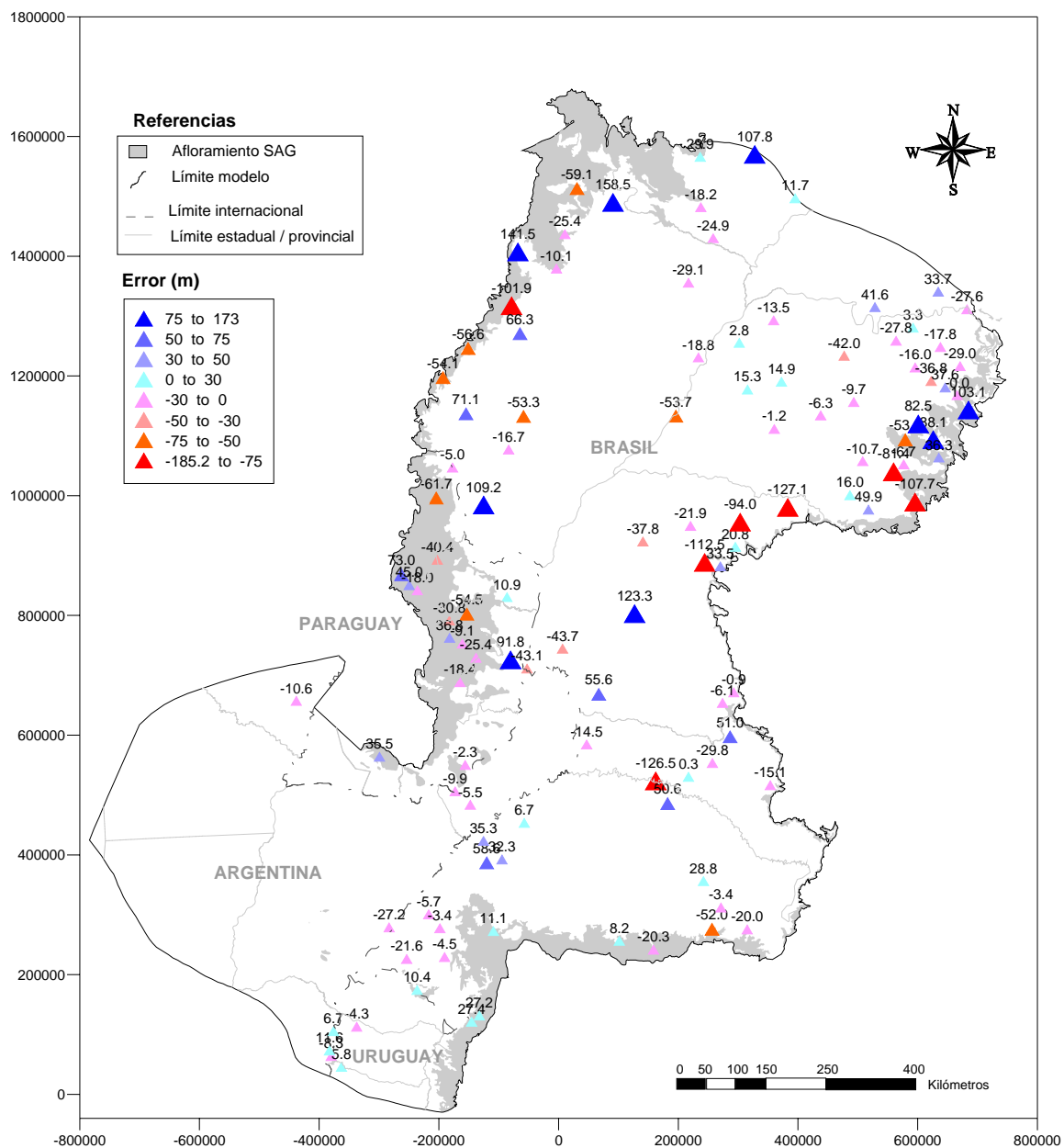
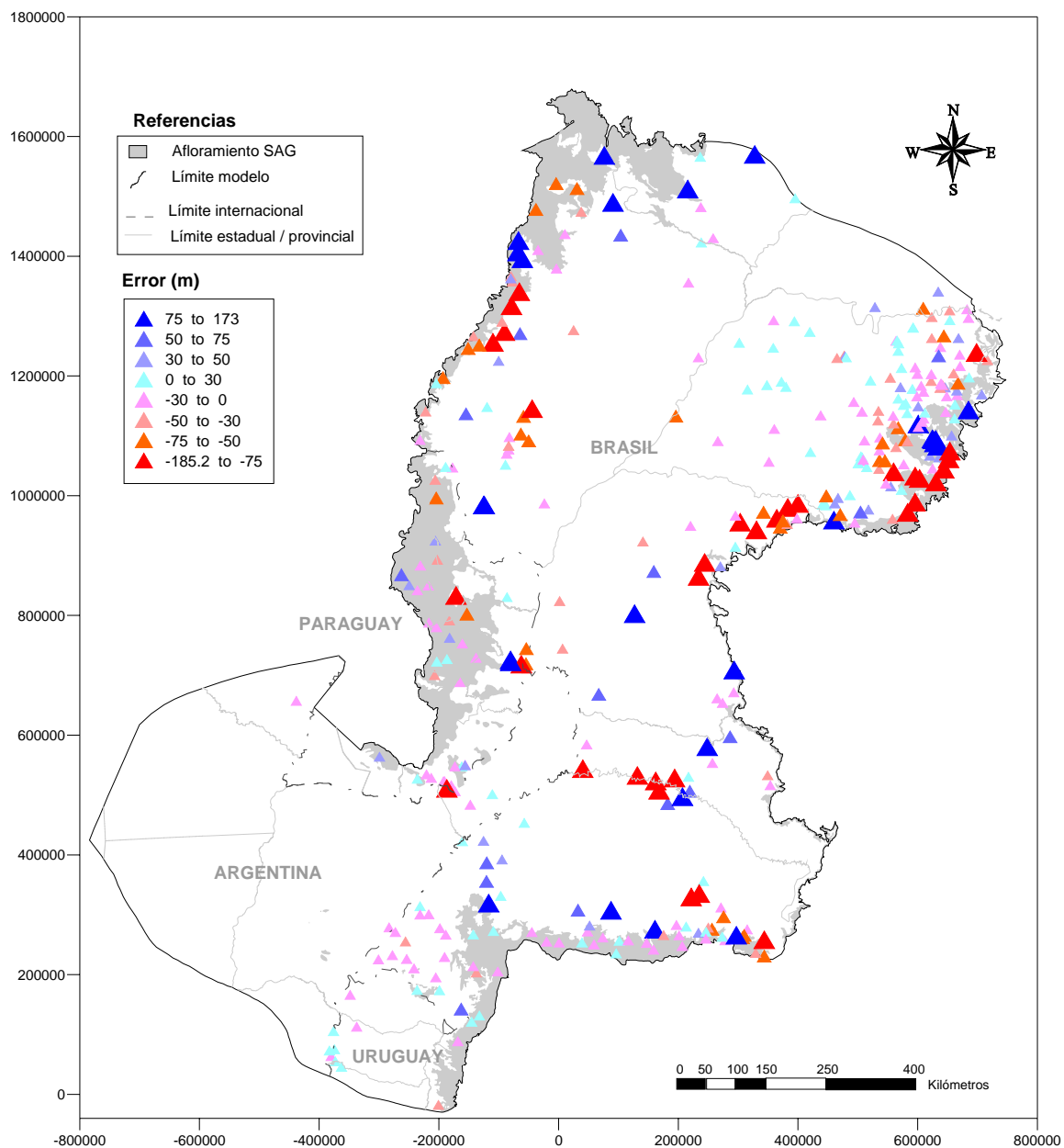
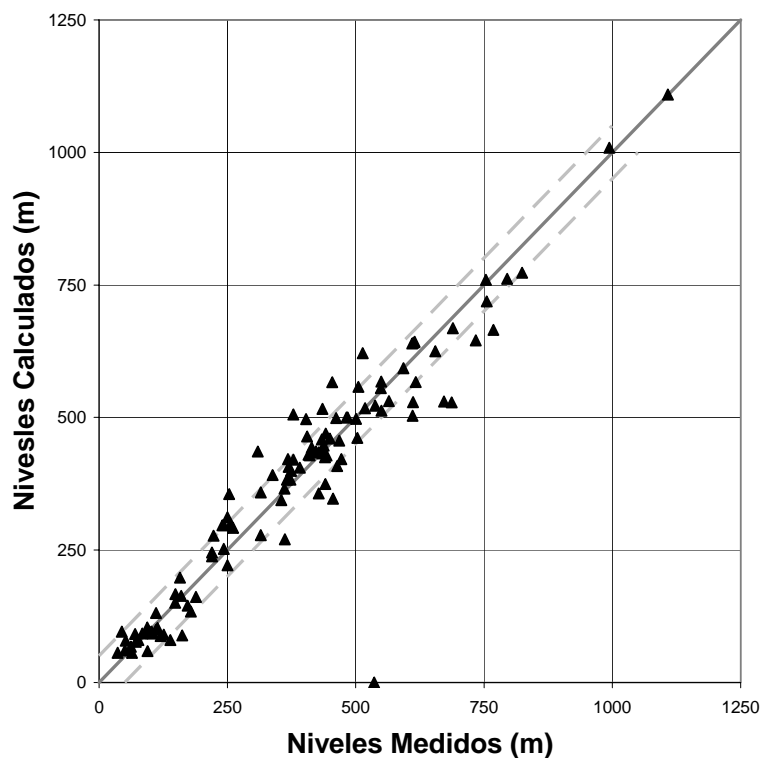


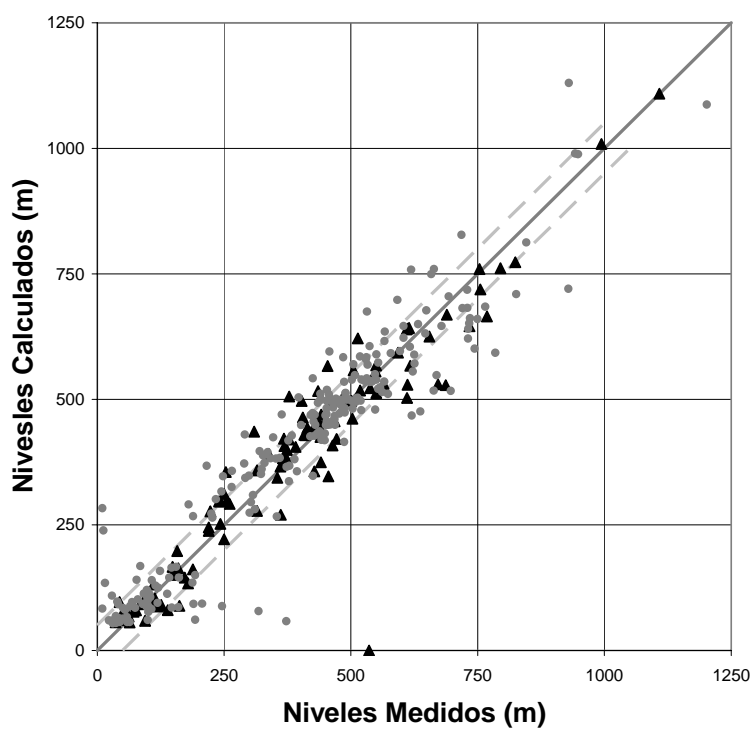
Figura IV.14 – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 3. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.15** – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 3. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.16** – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 3.

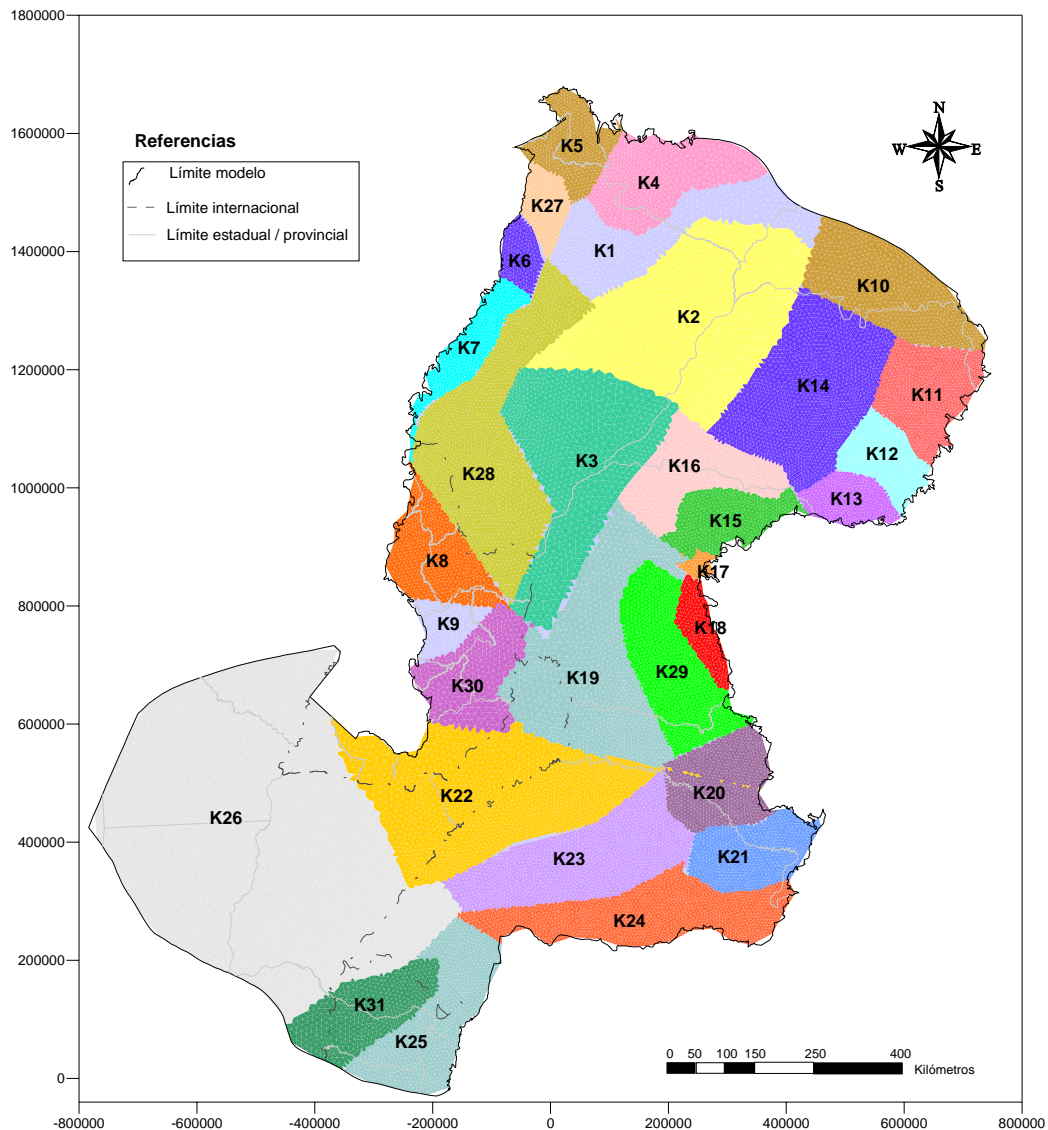


**Figura IV.17** – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 3.



**Tabla IV.5 – Balance de masas, Escenario 3.** Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.

Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3756840	43.5			-84452	-1.0	166569	1.9
2	128072	1.5			-69066	-0.8	-2241	0.0
3	265171	3.1			-16180	-0.2	561065	6.5
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-118751	-1.4
5	96242	1.1			-61305	-0.7	-3063	0.0
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-343496	-4.0
7	130836	1.5			-17677	-0.2	-516251	-6.0
8	828324	9.6			-54350	-0.6	-323067	-3.7
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	-574123	-6.6
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-281012	-3.3
11	204625	2.4			-16957	-0.2	15595	0.2
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-215877	-2.5
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-280681	-3.2
14	0	0.0			-537286	-6.2	-454878	-5.3
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-238009	-2.8
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-236045	-2.7
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-301004	-3.5
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-912869	-10.6
19	20131	0.2			-251701	-2.9	83076	1.0
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-665523	-7.7
21					653999	7.6	-637936	-7.4
22					1175910	13.6	18845	0.2
23							94511	1.1
24							-318343	-3.7
25							-172935	-2.0
26							-828277	-9.6
27							-64547	-0.7
28							-189019	-2.2
29							-426396	-4.9
30							-567505	-6.6
31							-29735	-0.3
32							278622	3.2
33							-1074010	-12.4
34			101747	1.2				
35			-79319	-0.9				
36			-214508	-2.5				
<b>TOTALES</b>	<b>9765465</b>	<b>113.0</b>	<b>-192080</b>	<b>-2.2</b>	<b>-1016073</b>	<b>-11.8</b>	<b>-8557310</b>	<b>-99.04</b>



**Figura IV.18 – Zonificación de la conductividad hidráulica, Escenario 4.**

**Tabla IV.6 – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 4.**

Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)
1	1.28	11	5.98	21	1.20
2	7.95	12	9.30	22	7.89
3	144.31	13	16.10	23	18.95
4	44.00	14	2.69	24	23.67
5	1.16	15	4.23	25	12.29
6	0.88	16	100.00	26	9.06
7	12.50	17	1.45	27	66.80
8	5.40	18	2.54	28	3.06
9	1.75	19	2.82	29	9.43
10	10.46	20	5.06	30	34.62
				31	6.63



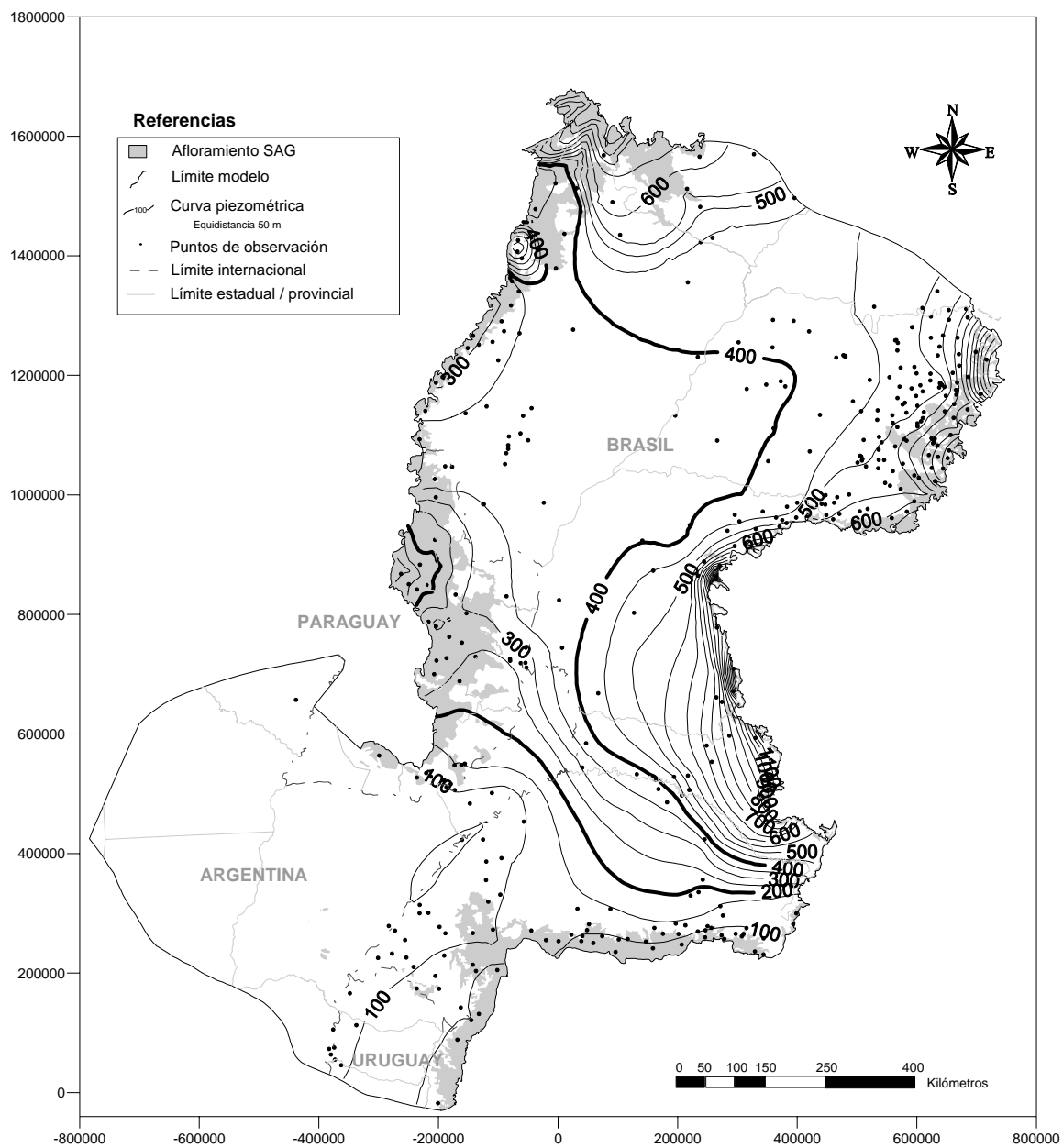


Figura IV.19 – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 4.

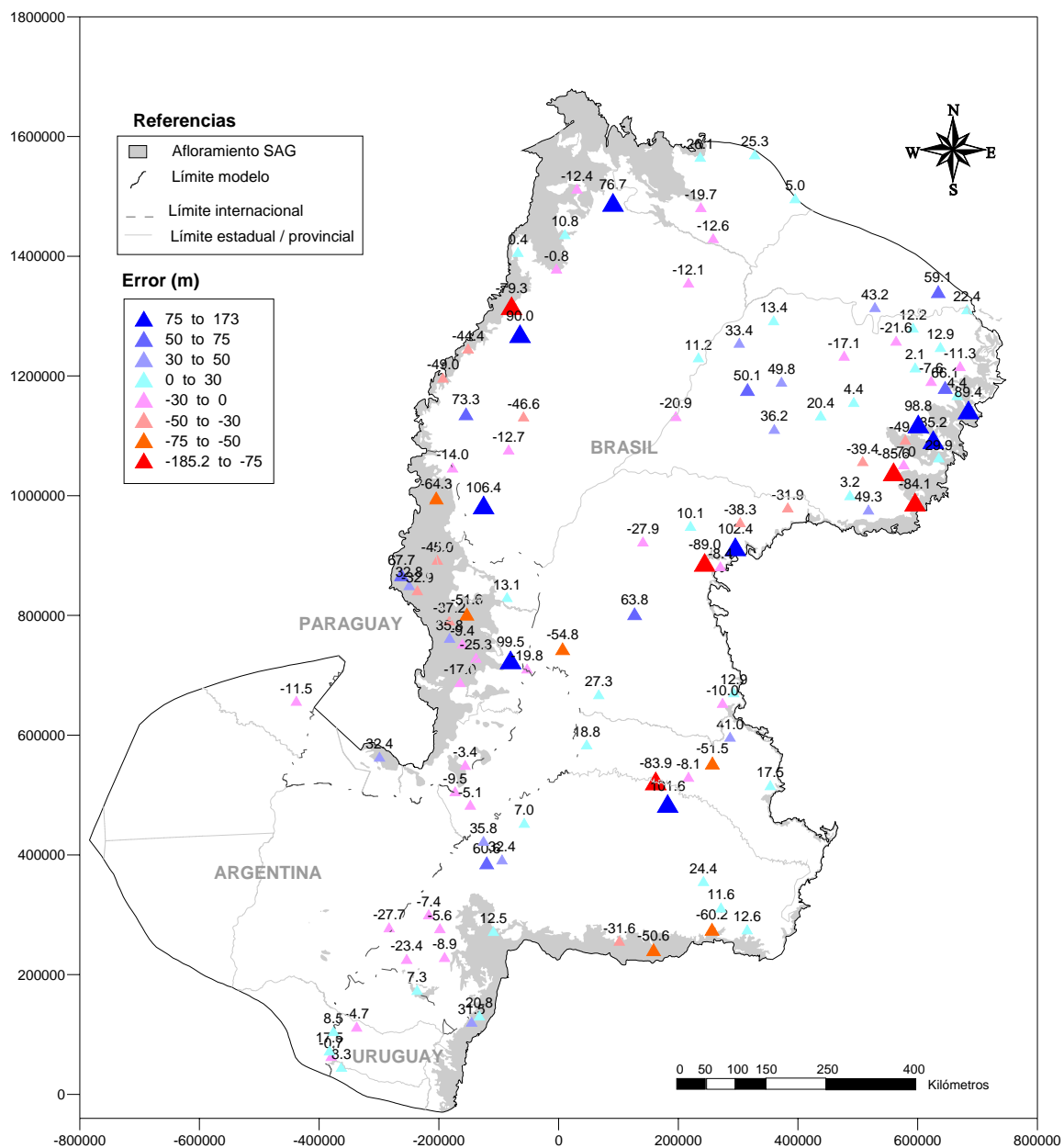
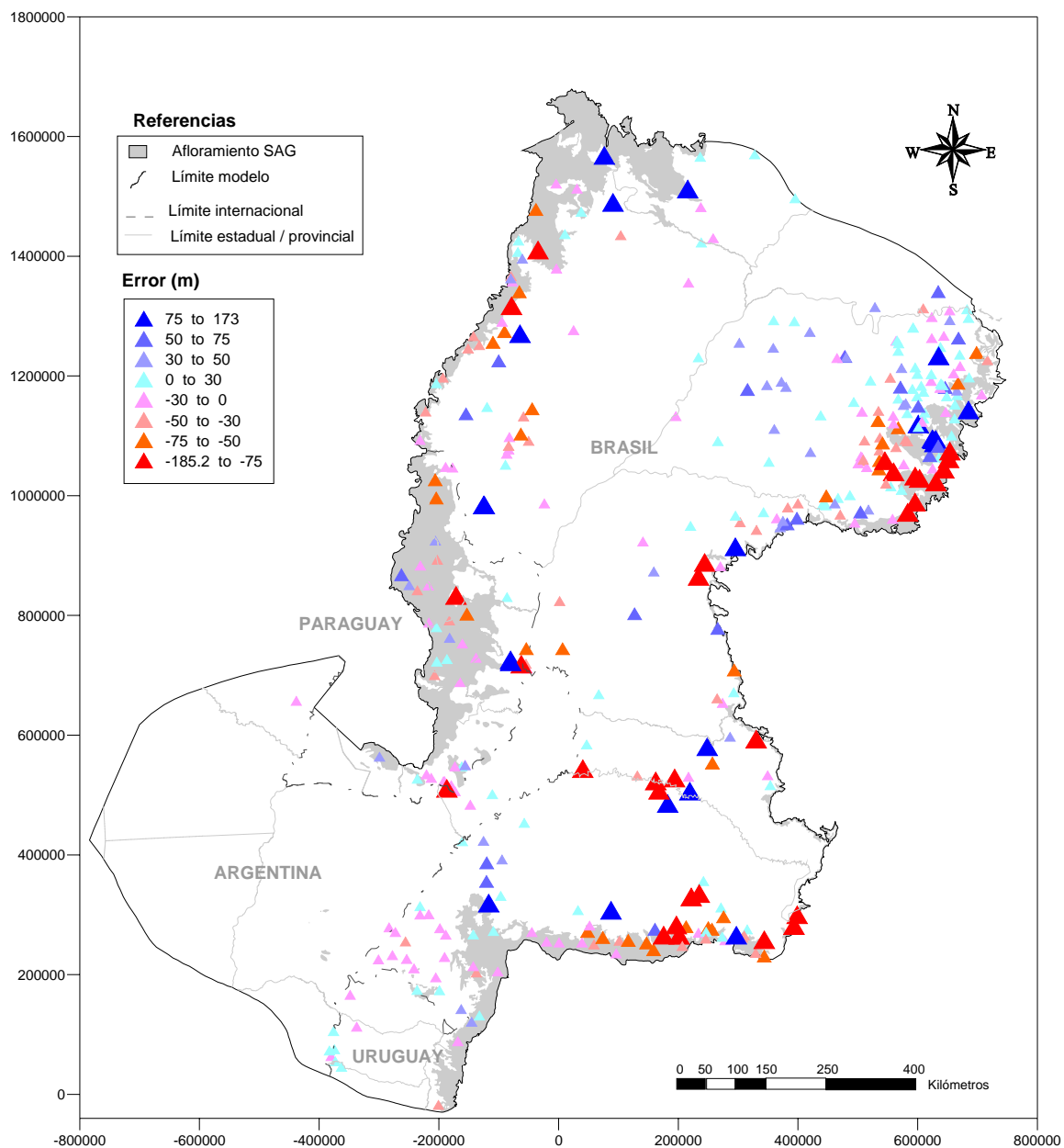


Figura IV.20 – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 4. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.21** – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 4. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.

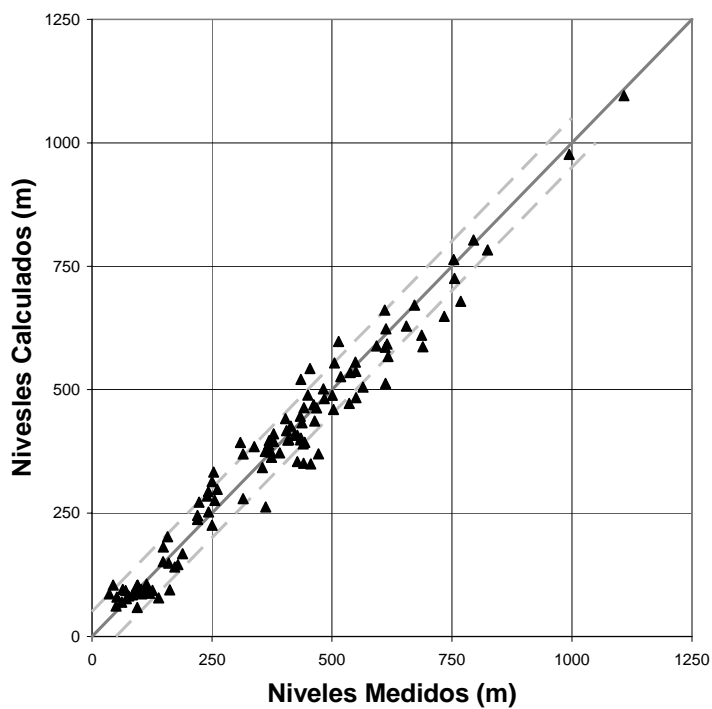


Figura IV.22 – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 4.

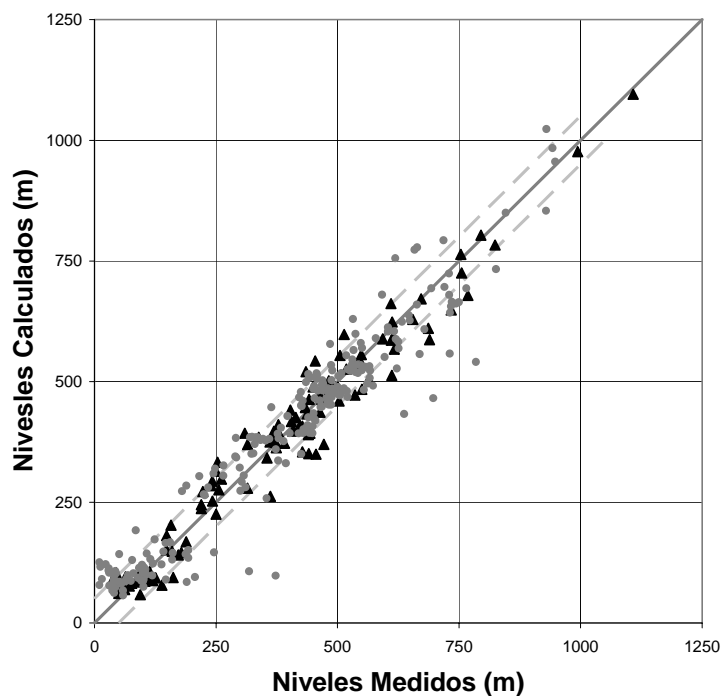
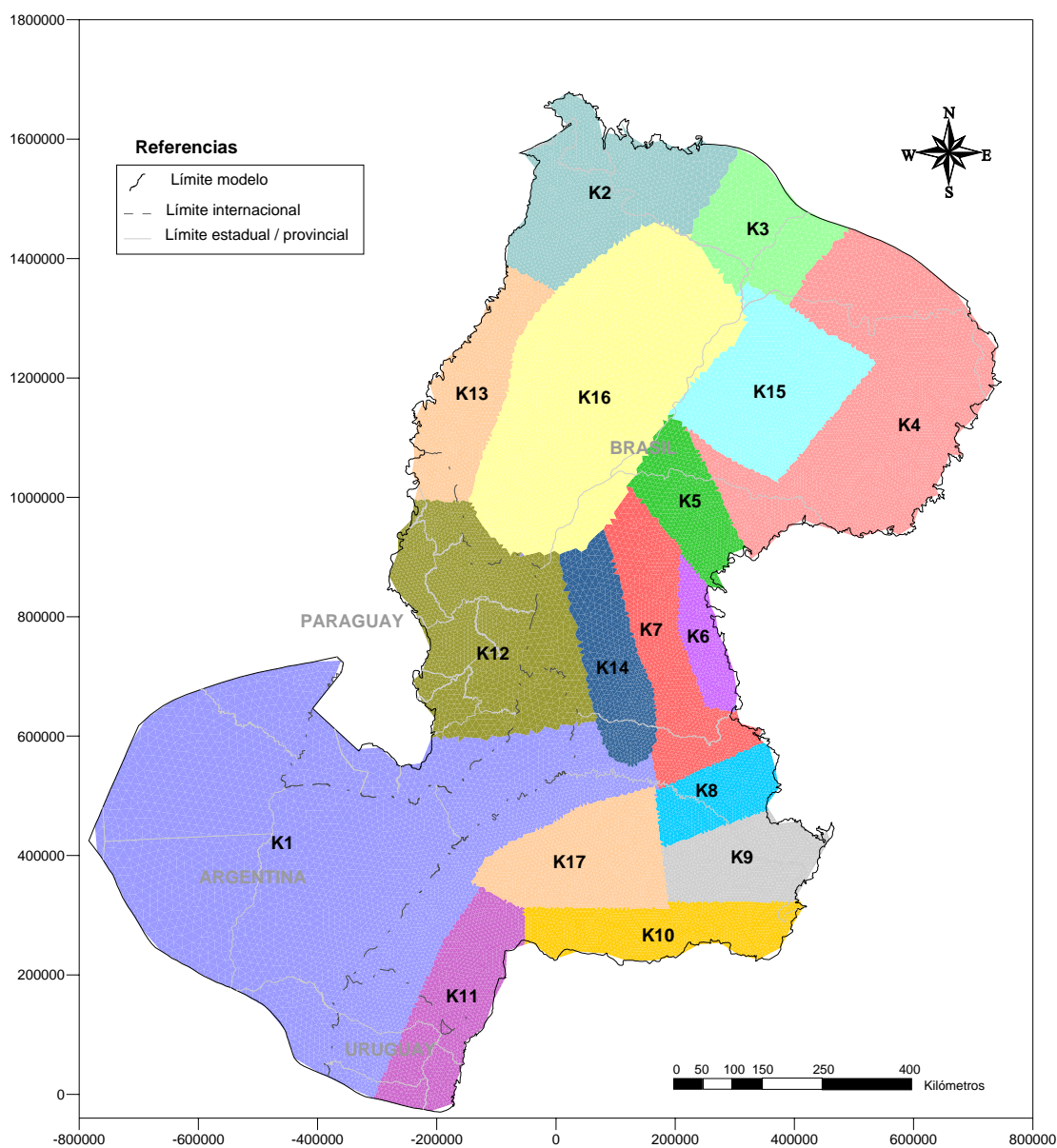


Figura IV.23 – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 4.



**Tabla IV.7 – Balance de masas, Escenario 4.** Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.

Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3756840	43.5			-84452	-1.0	378509	4.4
2	128072	1.5			-69066	-0.8	-1075310	-12.4
3	265171	3.1			-16180	-0.2	753537	8.7
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-135616	-1.6
5	96242	1.1			-61305	-0.7	-76387	-0.9
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-353895	-4.1
7	130836	1.5			-17677	-0.2	-240571	-2.8
8	828324	9.6			-54350	-0.6	19061	0.2
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	-328652	-3.8
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-269597	-3.1
11	204625	2.4			-16957	-0.2	-79370	-0.9
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-170402	-2.0
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-248565	-2.9
14	0	0.0			-537286	-6.2	-307781	-3.6
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-185597	-2.1
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-250795	-2.9
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-283663	-3.3
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-826625	-9.6
19	20131	0.2			-251701	-2.9	27869	0.3
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-79604	-0.9
21					653999	7.6	-838633	-9.7
22					1175910	13.6	-36522	-0.4
23							-3684	0.0
24							-385264	-4.5
25							19767	0.2
26							-911054	-10.5
27							-21858	-0.3
28							-178694	-2.1
29							-390838	-4.5
30							-543723	-6.3
31							-143724	-1.7
32							1661	0.0
33							-1065570	-12.3
34			-55525	-0.6				
35			-308528	-3.6				
36			-153750	-1.8				
<b>TOTALES</b>	<b>9765465</b>	<b>113.0</b>	<b>-517803</b>	<b>-6.0</b>	<b>-1016073</b>	<b>-11.8</b>	<b>-8231591</b>	<b>-95.3</b>



**Figura IV.24** – Zonificación de la conductividad hidráulica, Escenario 5.

**Tabla IV.8** – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 5.

Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)
1	5.65	11	8.55
2	2.14	12	10.51
3	1.17	13	7.52
4	7.60	14	4.79
5	3.43	15	2.00
6	4.10	16	15.81
7	8.54	17	25.32
8	5.29		
9	1.43		
10	20.57		

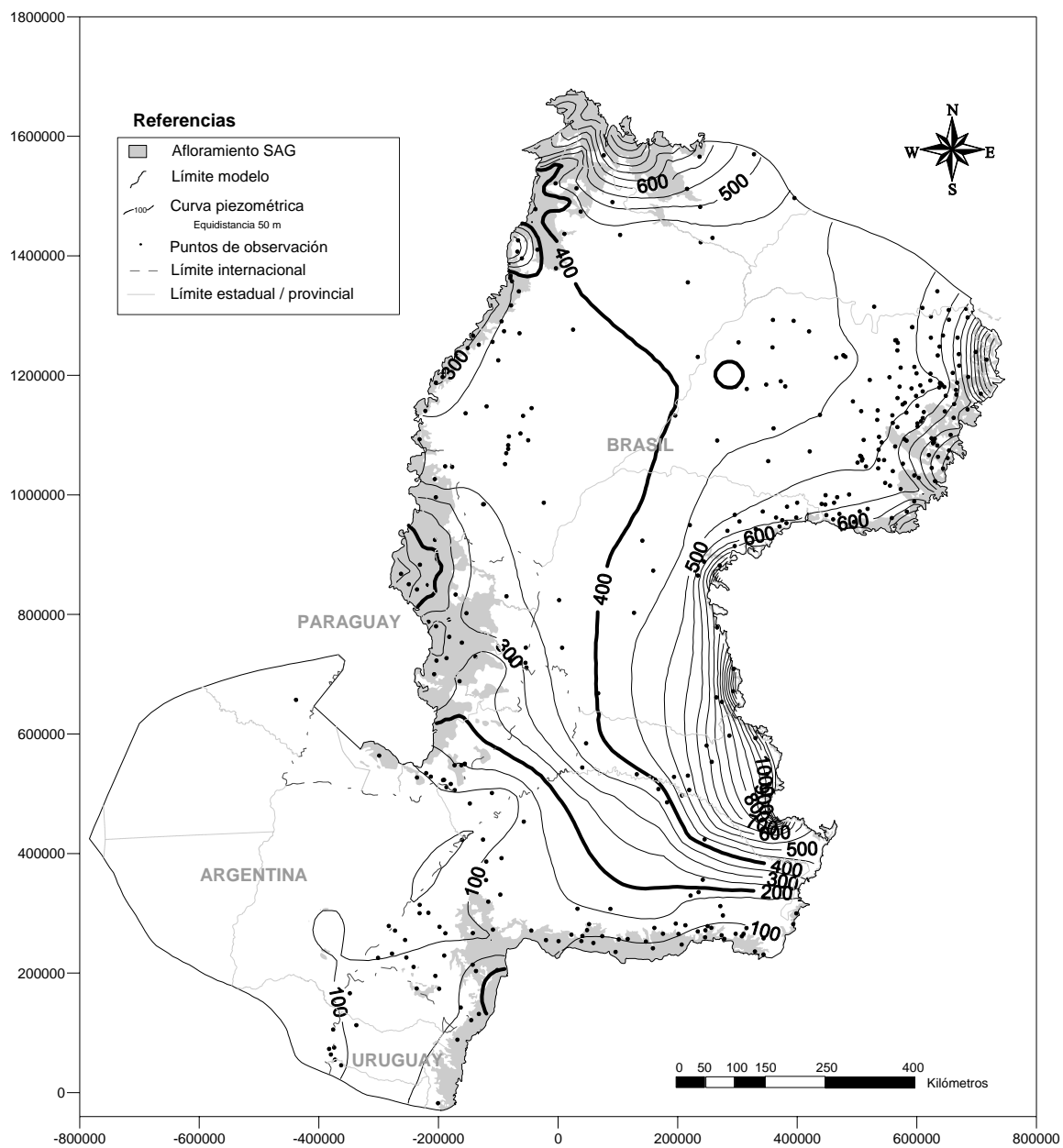
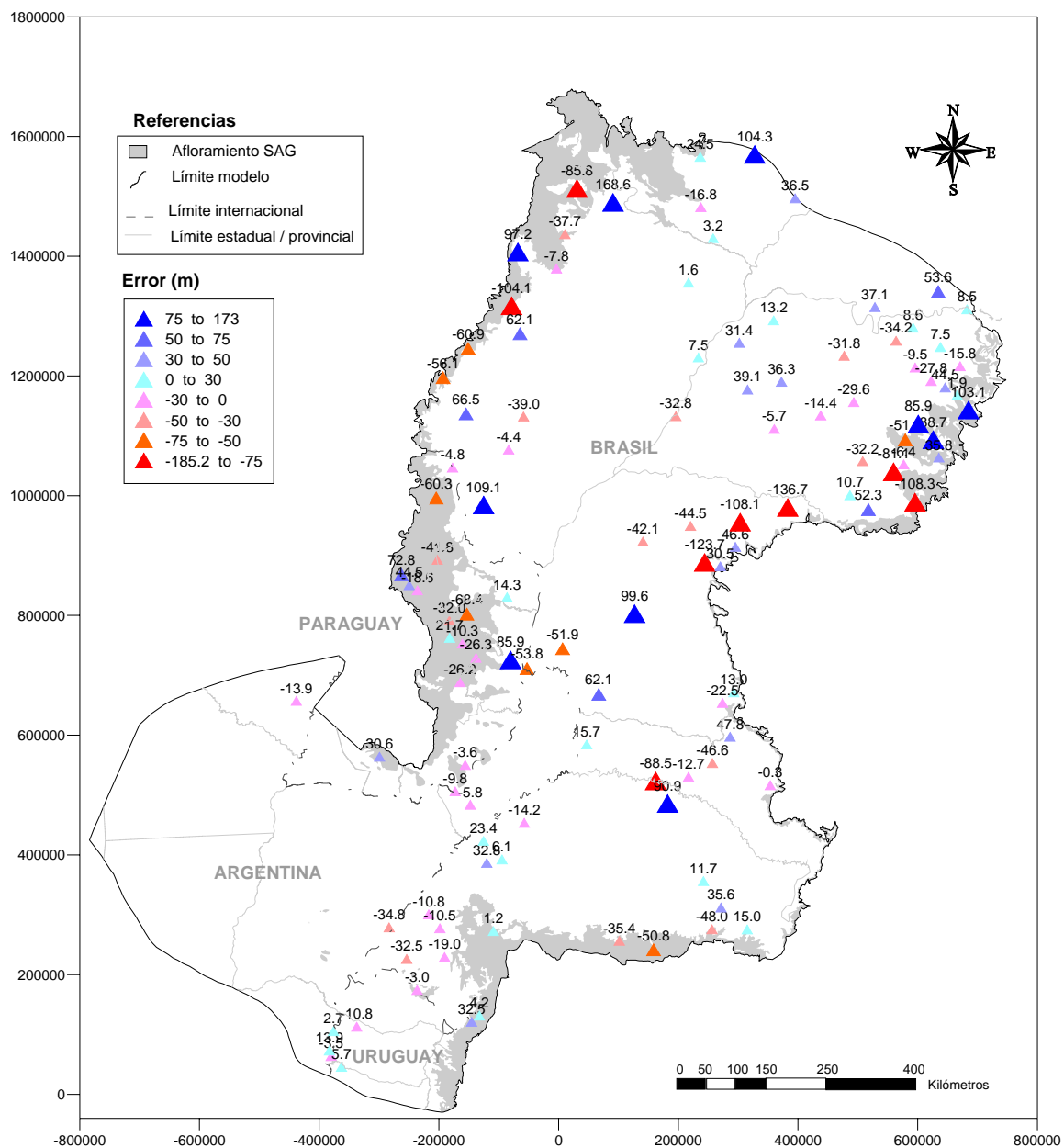
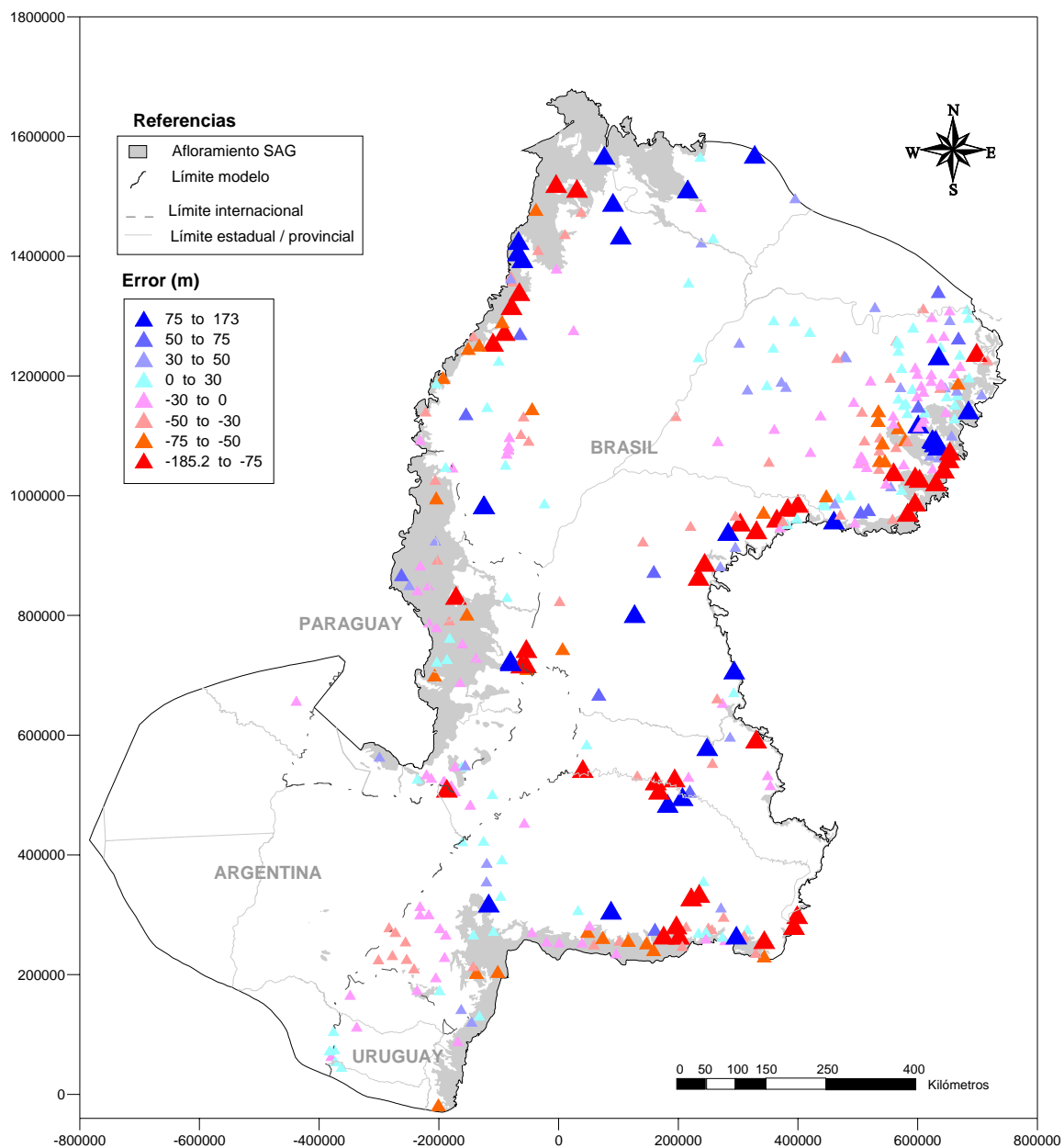


Figura IV.25 – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 5.





**Figura IV.26** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 5. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.27** – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 5. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.

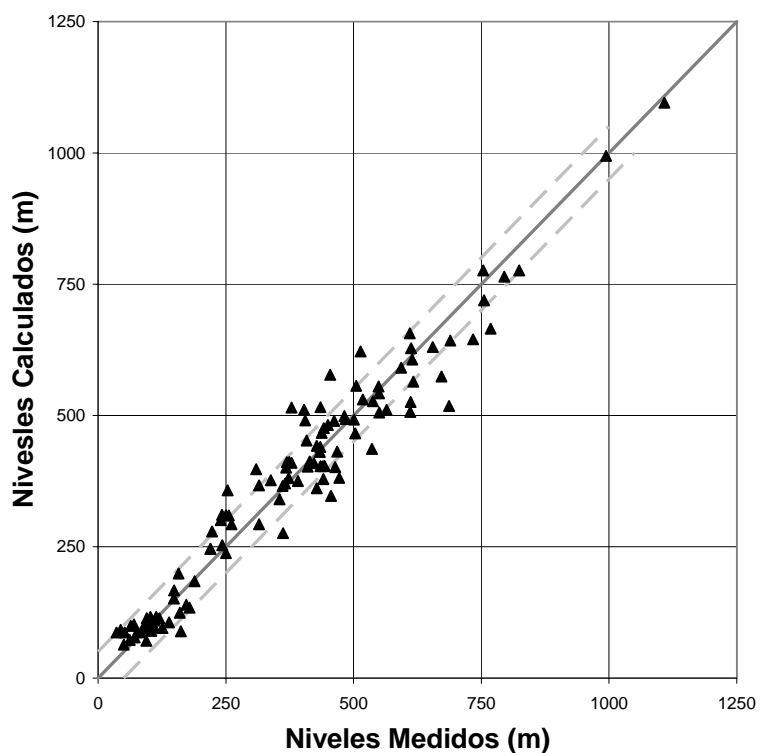


Figura IV.28 – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 5.

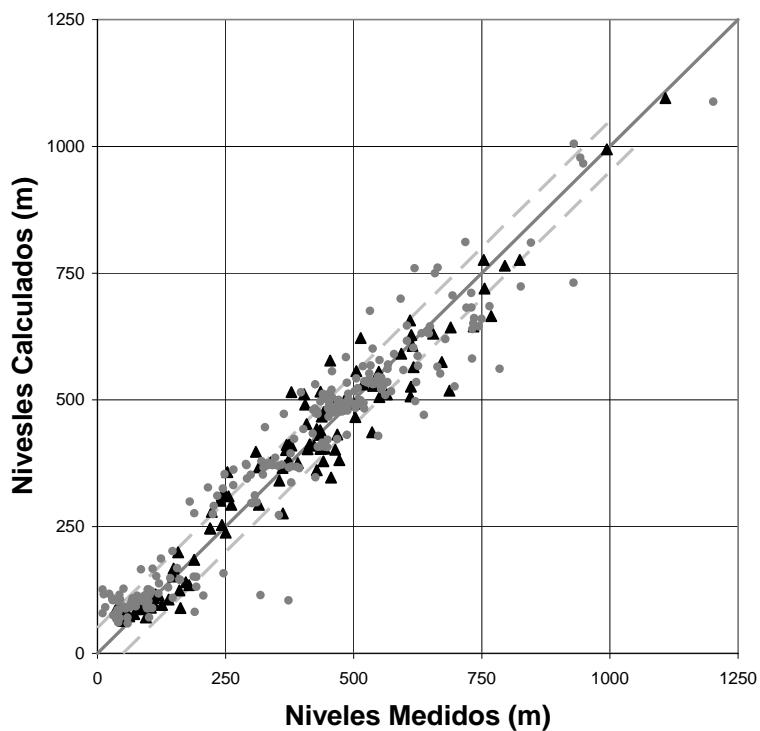


Figura IV.29 – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 5.



**Tabla IV.9 – Balance de masas, Escenario 5.** Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.

Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3756840	43.5			-84452	-1.0	26955	0.3
2	128072	1.5			-69066	-0.8	-168568	-2.0
3	265171	3.1			-16180	-0.2	76655	0.9
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-131915	-1.5
5	96242	1.1			-61305	-0.7	-68777	-0.8
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-277515	-3.2
7	130836	1.5			-17677	-0.2	-305290	-3.5
8	828324	9.6			-54350	-0.6	-225066	-2.6
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	-287864	-3.3
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-282955	-3.3
11	204625	2.4			-16957	-0.2	37201	0.4
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-309652	-3.6
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-349683	-4.0
14	0	0.0			-537286	-6.2	-466312	-5.4
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-244928	-2.8
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-158169	-1.8
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-248270	-2.9
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-479657	-5.6
19	20131	0.2			-251701	-2.9	21774	0.3
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-88432	-1.0
21					653999	7.6	-771208	-8.9
22					1175910	13.6	-55685	-0.6
23							-39718	-0.5
24							-409979	-4.7
25							-140535	-1.6
26							-823778	-9.5
27							-69036	-0.8
28							-176095	-2.0
29							-401889	-4.7
30							-531365	-6.2
31							-105259	-1.2
32							-27449	-0.3
33							-973128	-11.3
34			-35108	-0.4				
35			-48883	-0.6				
36			-209813	-2.4				
<b>TOTALES</b>	<b>9765465</b>	<b>113.0</b>	<b>-293804</b>	<b>-3.4</b>	<b>-1016073</b>	<b>-11.8</b>	<b>-8455591</b>	<b>-97.9</b>



**Tabla IV.10** – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 6.

Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)
1	1.84	11	5.98	21	1.4
2	15.14	12	9.26	22	6.66
3	4.66	13	16.03	23	18.43
4	71.66	14	2.49	24	23.99
5	1.33	15	4.32	25	12.4
6	0.87	16	100	26	9.33
7	14.18	17	1.43	27	48.45
8	4.92	18	2.49	28	0.3
9	75	19	2.18	29	10.15
10	9.92	20	5	30	4.61
				31	6.69

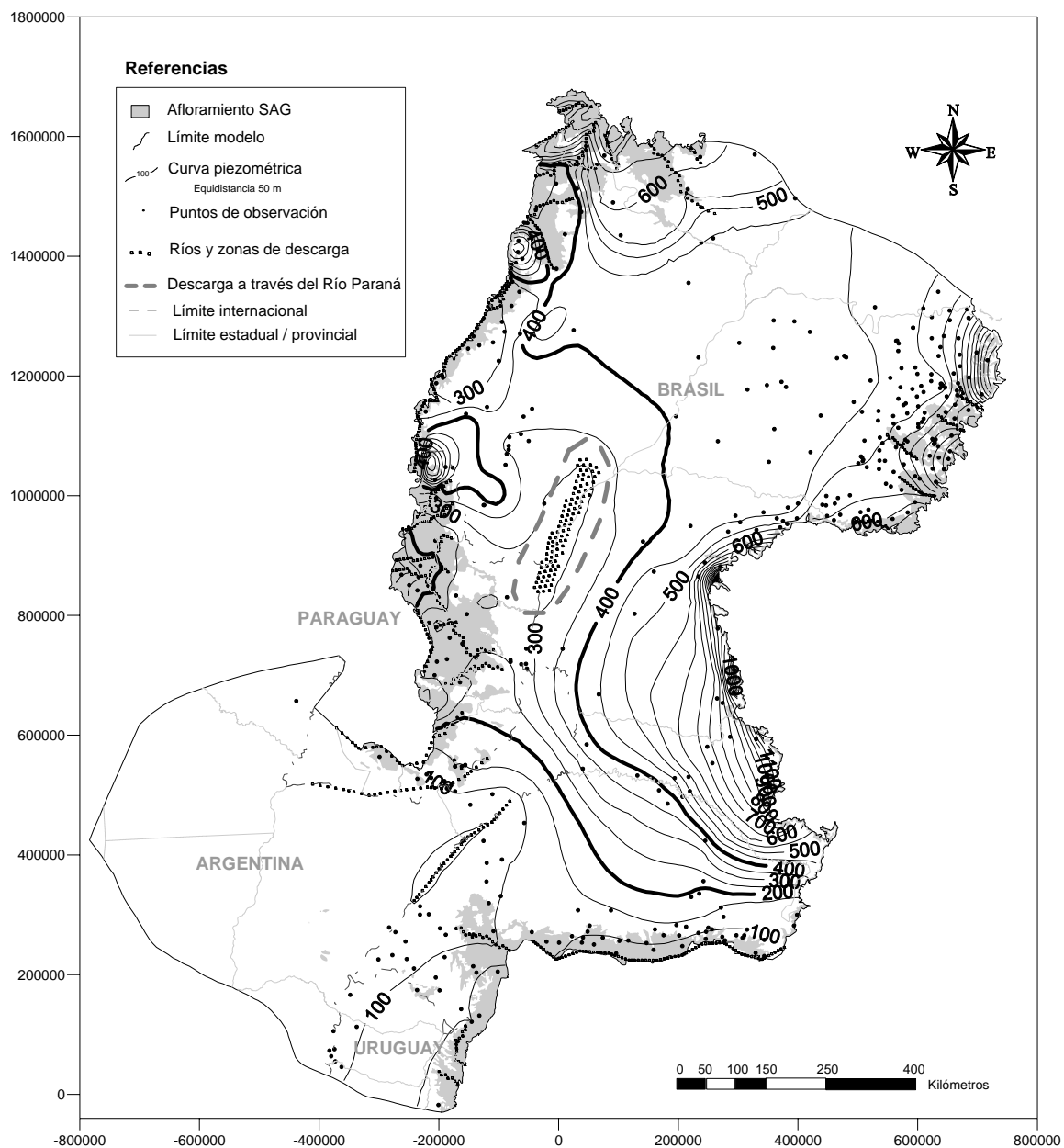
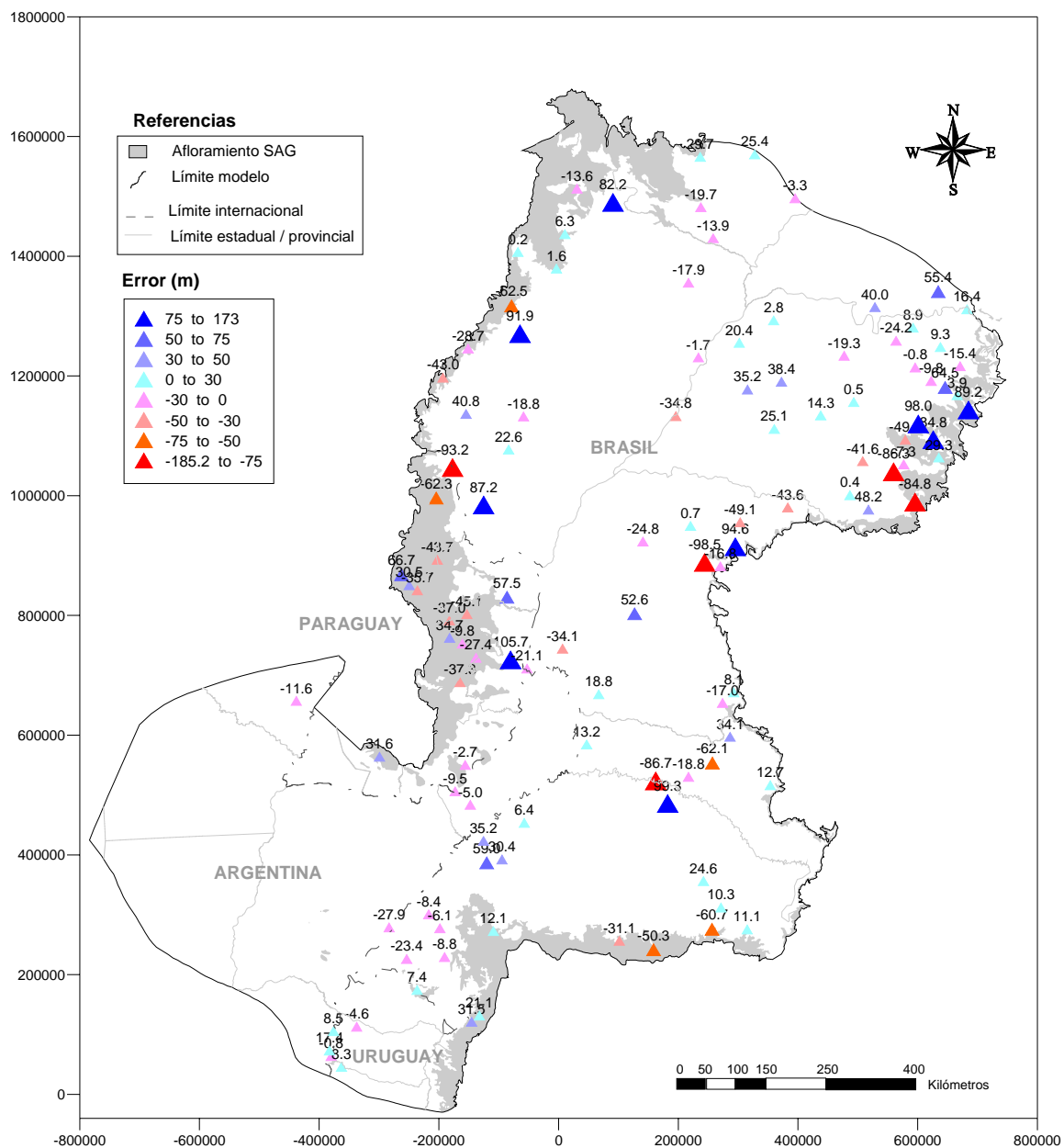
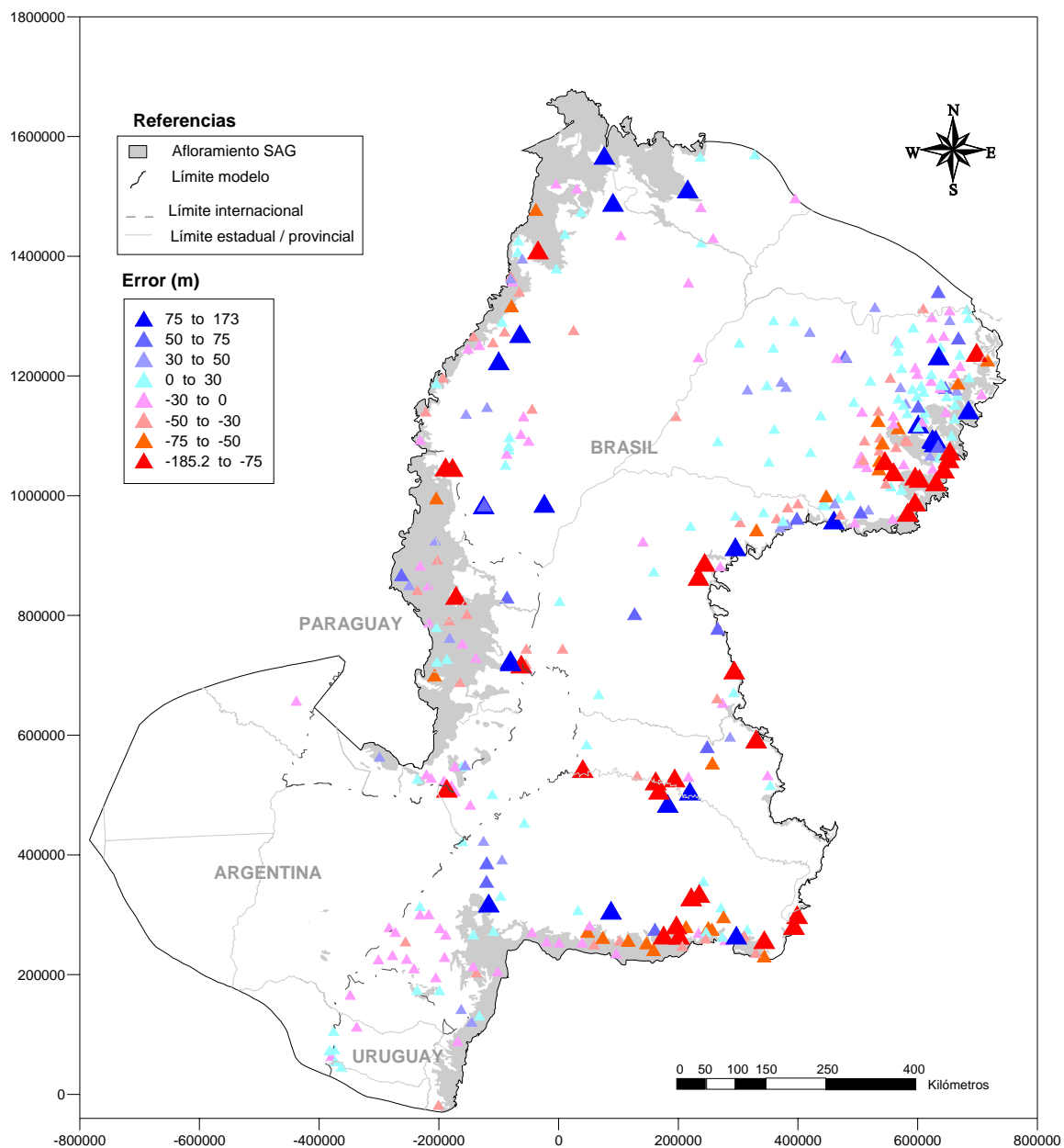


Figura IV.30 – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 6.



**Figura IV.31** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 6. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.





**Figura IV.32** – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 6. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.

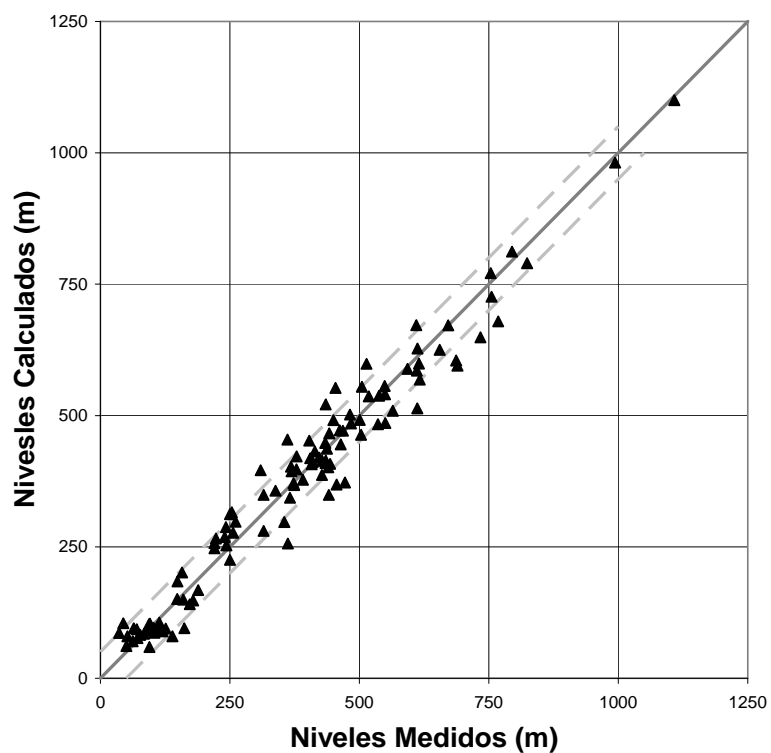


Figura IV.33 – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 6.

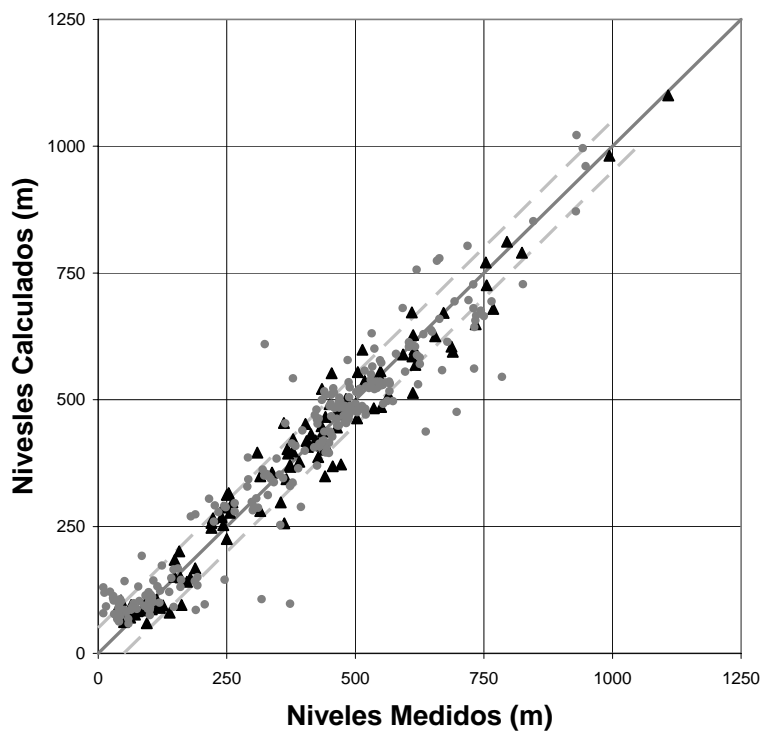
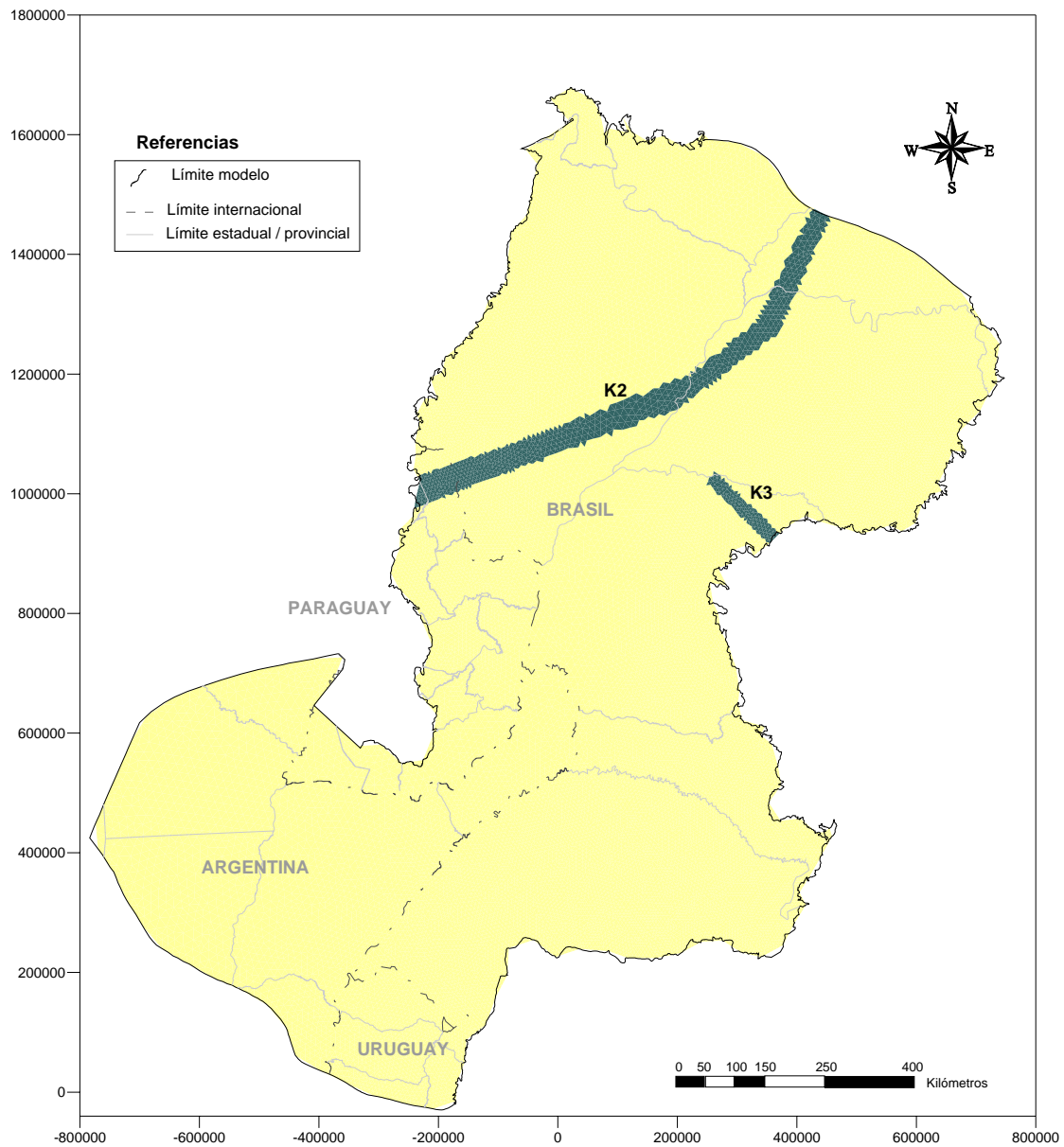


Figura IV.34 – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 6.



**Tabla IV.11** – Balance de masas, Escenario 6. Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.

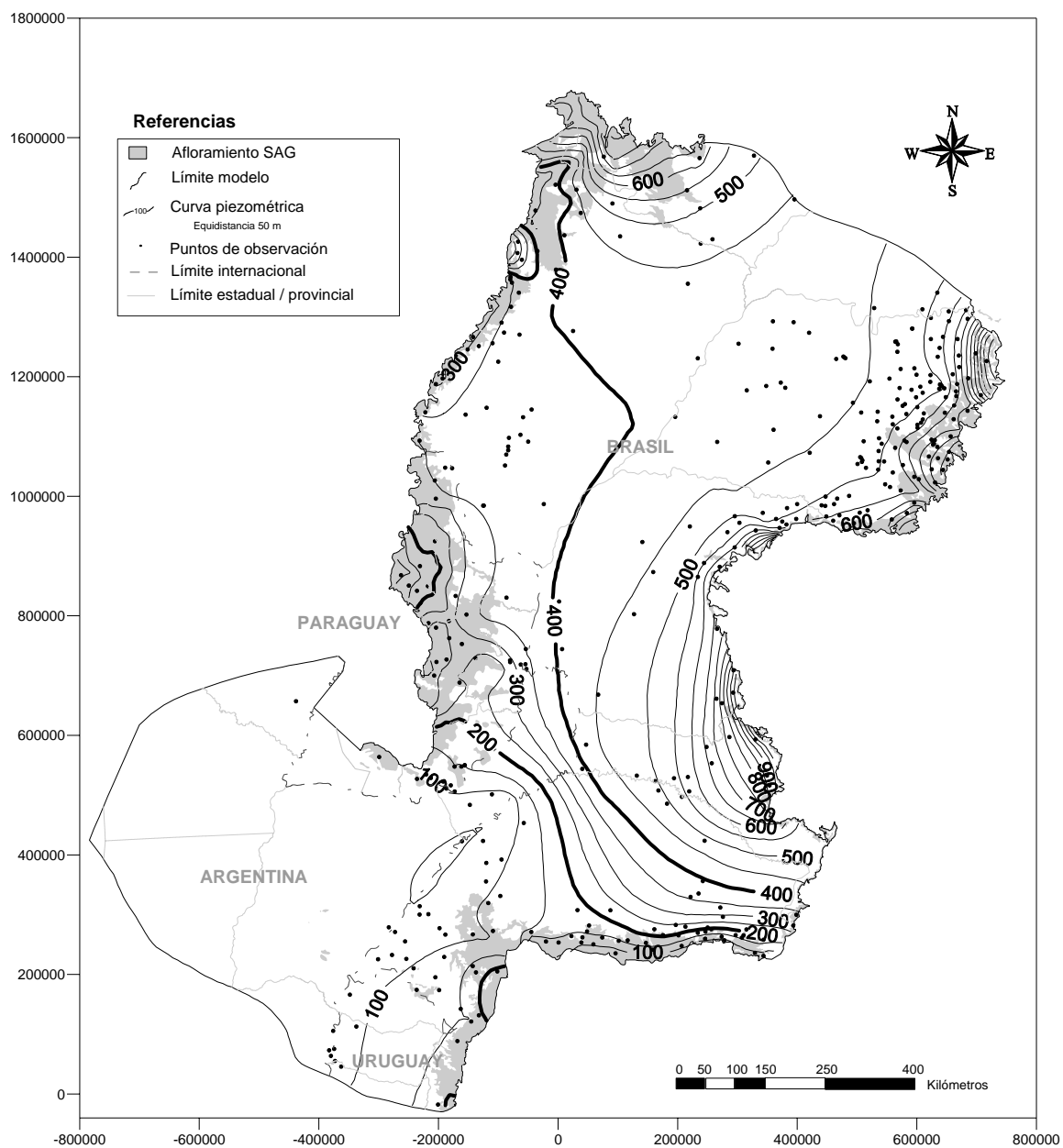
Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3756840	43.5			-84452	-1.0	558135	6.5
2	128072	1.5			-69066	-0.8	-1313300	-15.2
3	265171	3.1			-16180	-0.2	1021290	11.8
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-134979	-1.6
5	96242	1.1			-61305	-0.7	-73378	-0.8
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-324976	-3.8
7	130836	1.5			-17677	-0.2	-250224	-2.9
8	828324	9.6			-54350	-0.6	-128644	-1.5
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	-350154	-4.1
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-195279	-2.3
11	204625	2.4			-16957	-0.2	-134249	-1.6
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-103817	-1.2
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-186751	-2.2
14	0	0.0			-537286	-6.2	-274455	-3.2
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-178797	-2.1
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-111040	-1.3
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-246278	-2.9
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-271088	-3.1
19	20131	0.2			-251701	-2.9	27523	0.3
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-76271	-0.9
21					653999	7.6	-749853	-8.7
22					1175910	13.6	-35970	-0.4
23							-2560	0.0
24							-397199	-4.6
25							7289	0.1
26							-914154	-10.6
27							-36582	-0.4
28							-182182	-2.1
29							-397702	-4.6
30							-381934	-4.4
31							-233967	-2.7
32							-11612	-0.1
33							-1080730	-12.5
34			-54622	-0.6			-1146130	
35			-236191	-2.7				
36			-148564	-1.7				
<b>TOTALES</b>	<b>9765465</b>	<b>113.0</b>	<b>-439377</b>	<b>-5.1</b>	<b>-1016073</b>	<b>-11.8</b>	<b>-8310018</b>	<b>-82.9</b>



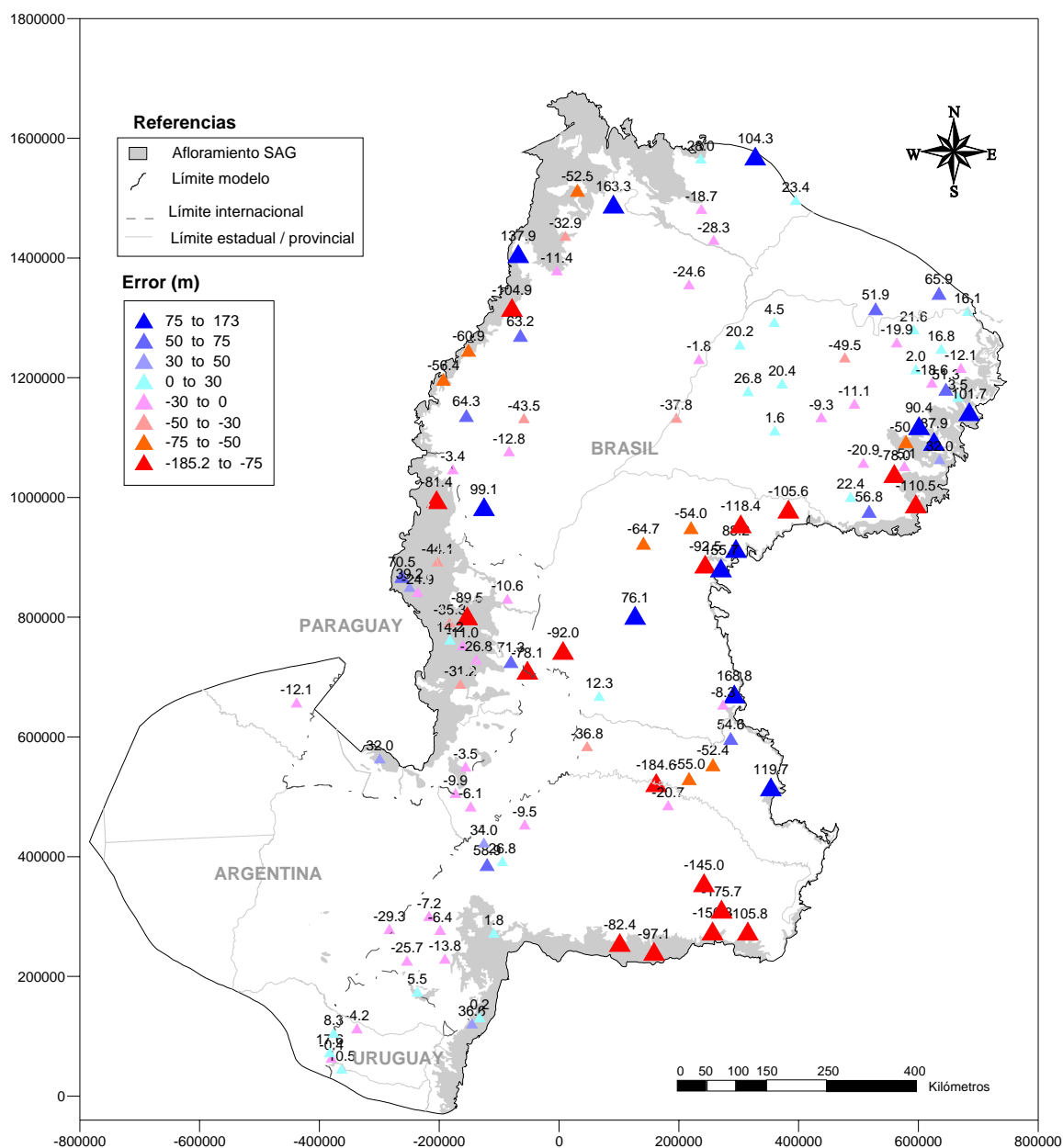
**Figura IV.35 – Zonificación de la conductividad hidráulica, Escenario 7. Hipótesis de estructuras con conductividad uniforme.**

**Tabla IV.12 – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 7. Hipótesis de estructuras con Conductividad uniforme.**

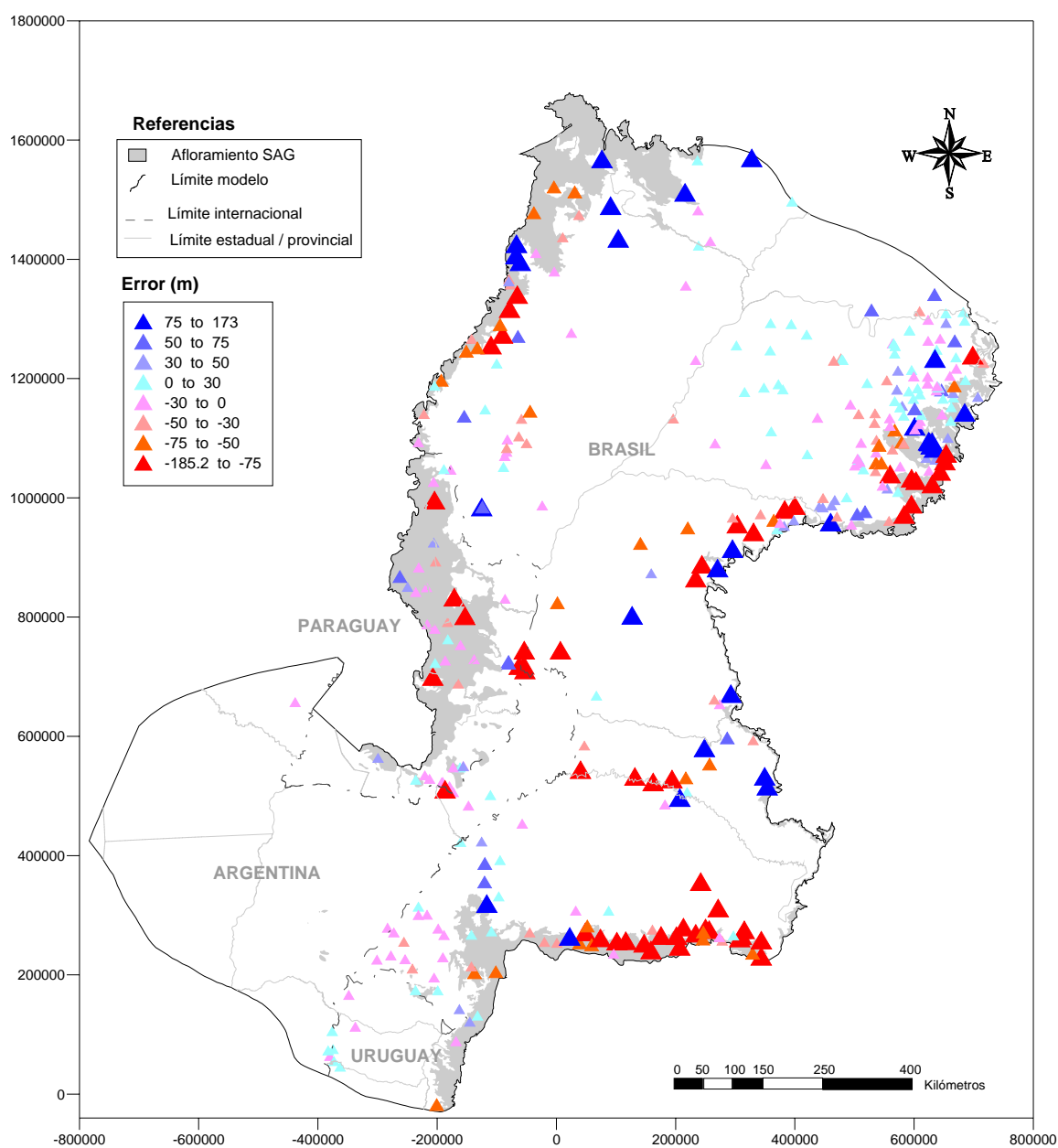
ZONA	K (m/d)
1	7.4
2	154.1
3	0.5



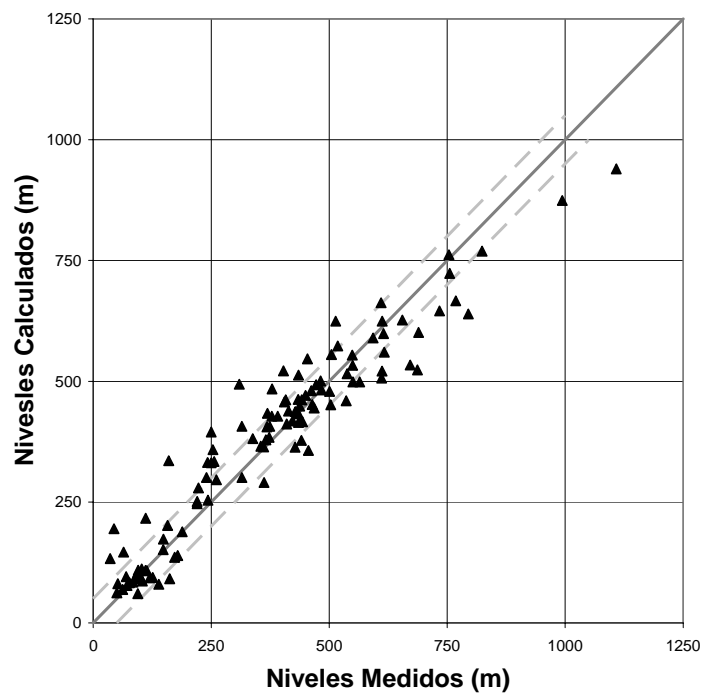
**Figura IV.36** – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 7. Hipótesis de estructuras con conductividad uniforme.



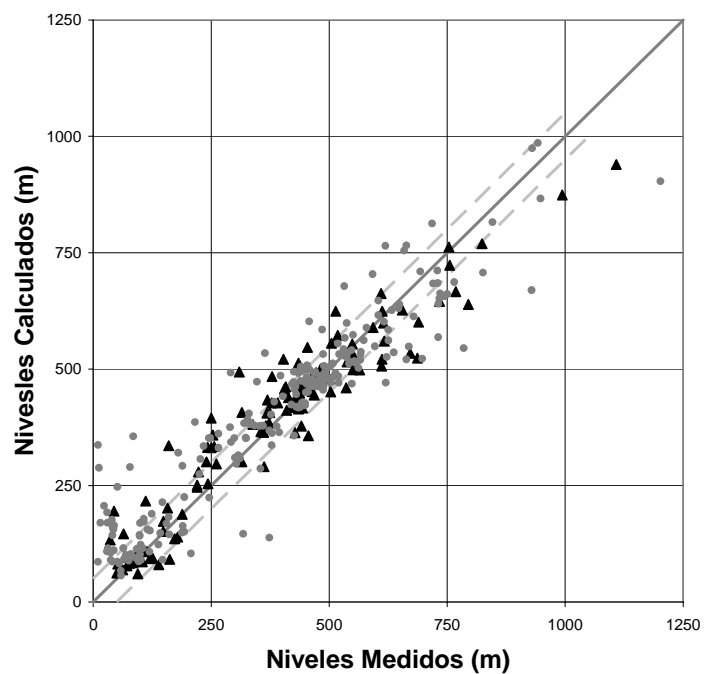
**Figura IV.37** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 7. Hipótesis de estructuras con conductividad uniforme. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.38** – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 7. Hipótesis de estructuras con conductividad uniforme. . El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.39** – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 7. Hipótesis de estructuras con conductividad uniforme.



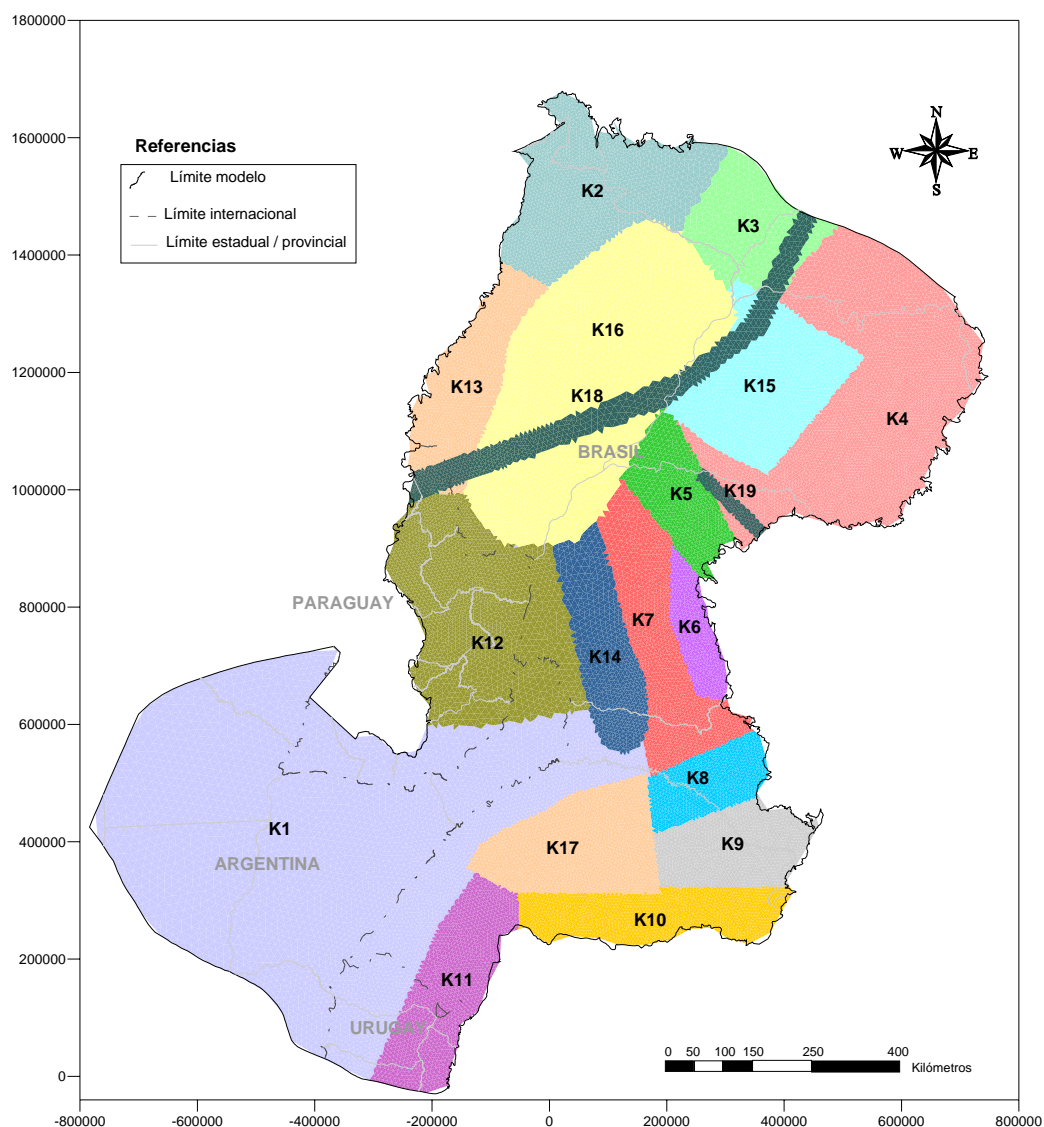
**Figura IV.40** – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 7. Hipótesis de estructuras con conductividad uniforme.





**Tabla IV.13** – Balance de masas, Escenario 7. Hipótesis de estructuras con conductividad uniforme. Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.

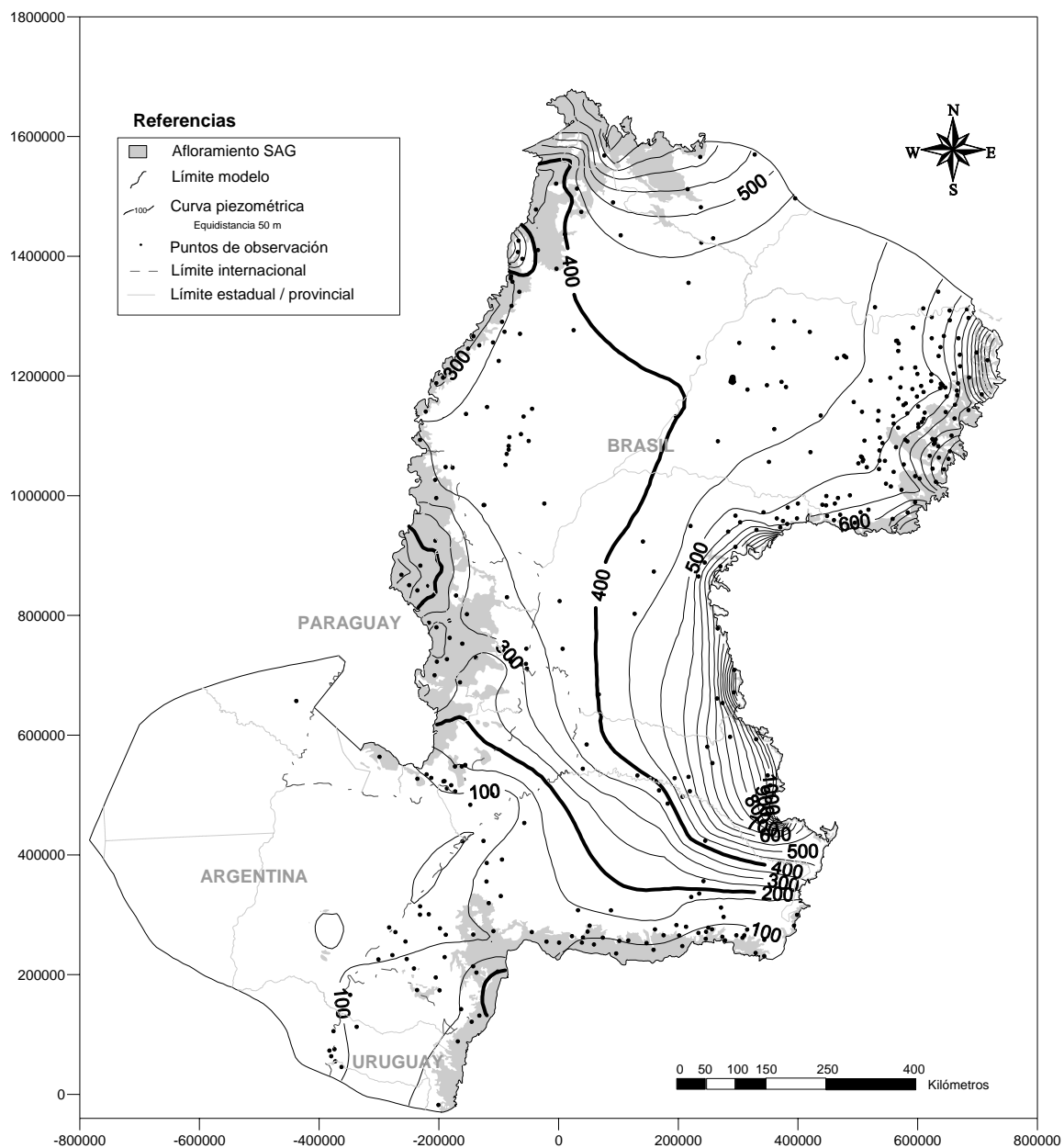
Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3756840	43.5			-84452	-1.0	107185	1.2
2	128072	1.5			-69066	-0.8	-121443	-1.4
3	265171	3.1			-16180	-0.2	694441	8.0
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-113261	-1.3
5	96242	1.1			-61305	-0.7	21683	0.3
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-360382	-4.2
7	130836	1.5			-17677	-0.2	-606641	-7.0
8	828324	9.6			-54350	-0.6	-395318	-4.6
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	-589393	-6.8
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-257449	-3.0
11	204625	2.4			-16957	-0.2	-336645	-3.9
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-370312	-4.3
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-319807	-3.7
14	0	0.0			-537286	-6.2	-383442	-4.4
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-219811	-2.5
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-138388	-1.6
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-298583	-3.5
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-430868	-5.0
19	20131	0.2			-251701	-2.9	26578	0.3
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-99612	-1.2
21					653999	7.6	-836175	-9.7
22					1175910	13.6	-53865	-0.6
23							-37859	-0.4
24							-351410	-4.1
25							-125898	-1.5
26							-799227	-9.3
27							-25322	-0.3
28							-166034	-1.9
29							-391757	-4.5
30							-516379	-6.0
31							-121140	-1.4
32							-6503	-0.1
33							-948951	-11.0
34			69982	0.8				
35			-72055	-0.8				
36			-175330	-2.0				
<b>TOTALES</b>	<b>9765465</b>	<b>113.0</b>	<b>-177404</b>	<b>-2.1</b>	<b>-1016073</b>	<b>-11.8</b>	<b>-8571988</b>	<b>-99.2</b>



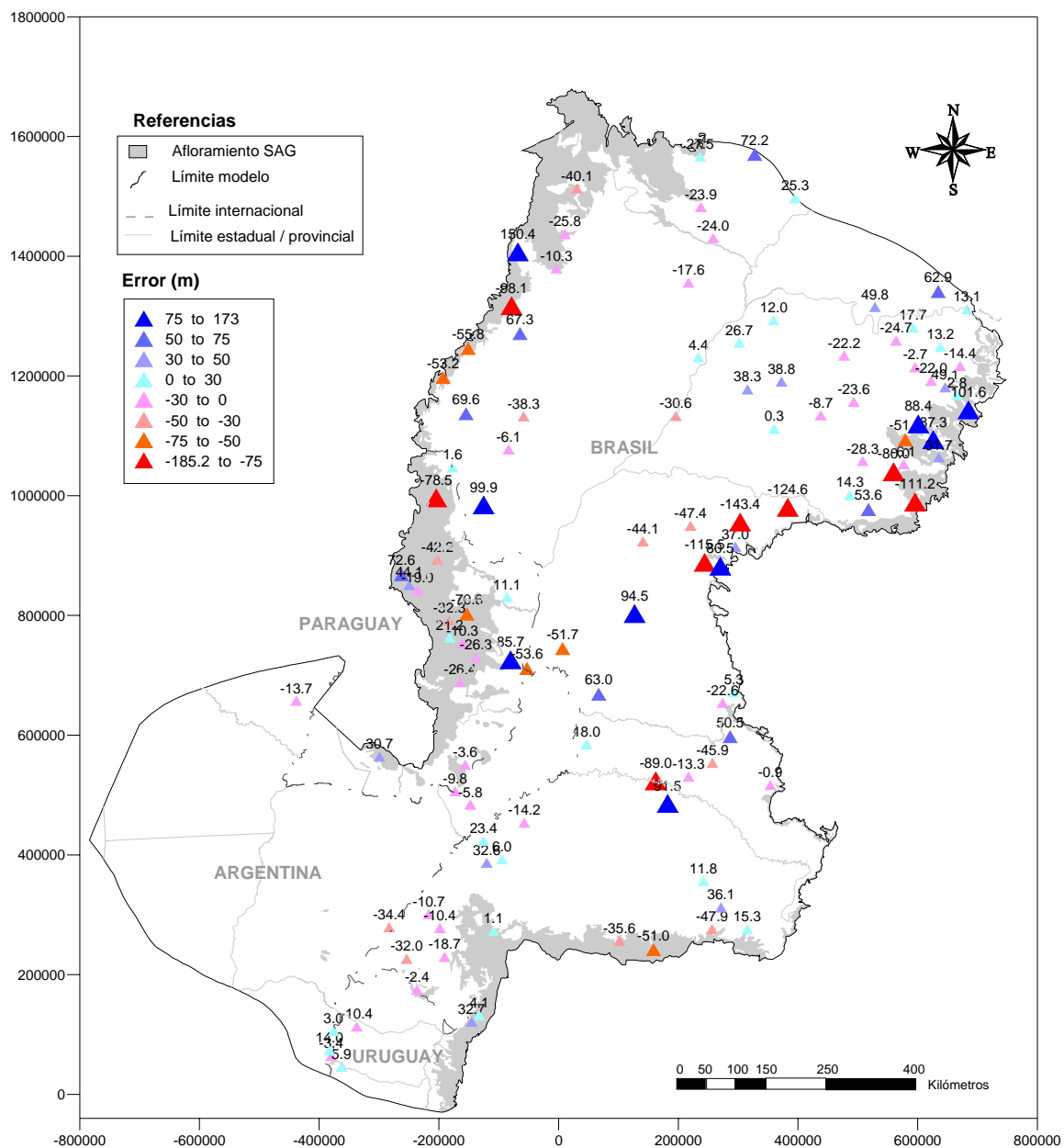
**Figura IV.41** – Zonificación de la conductividad hidráulica, Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5.

**Tabla IV.14** – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5.

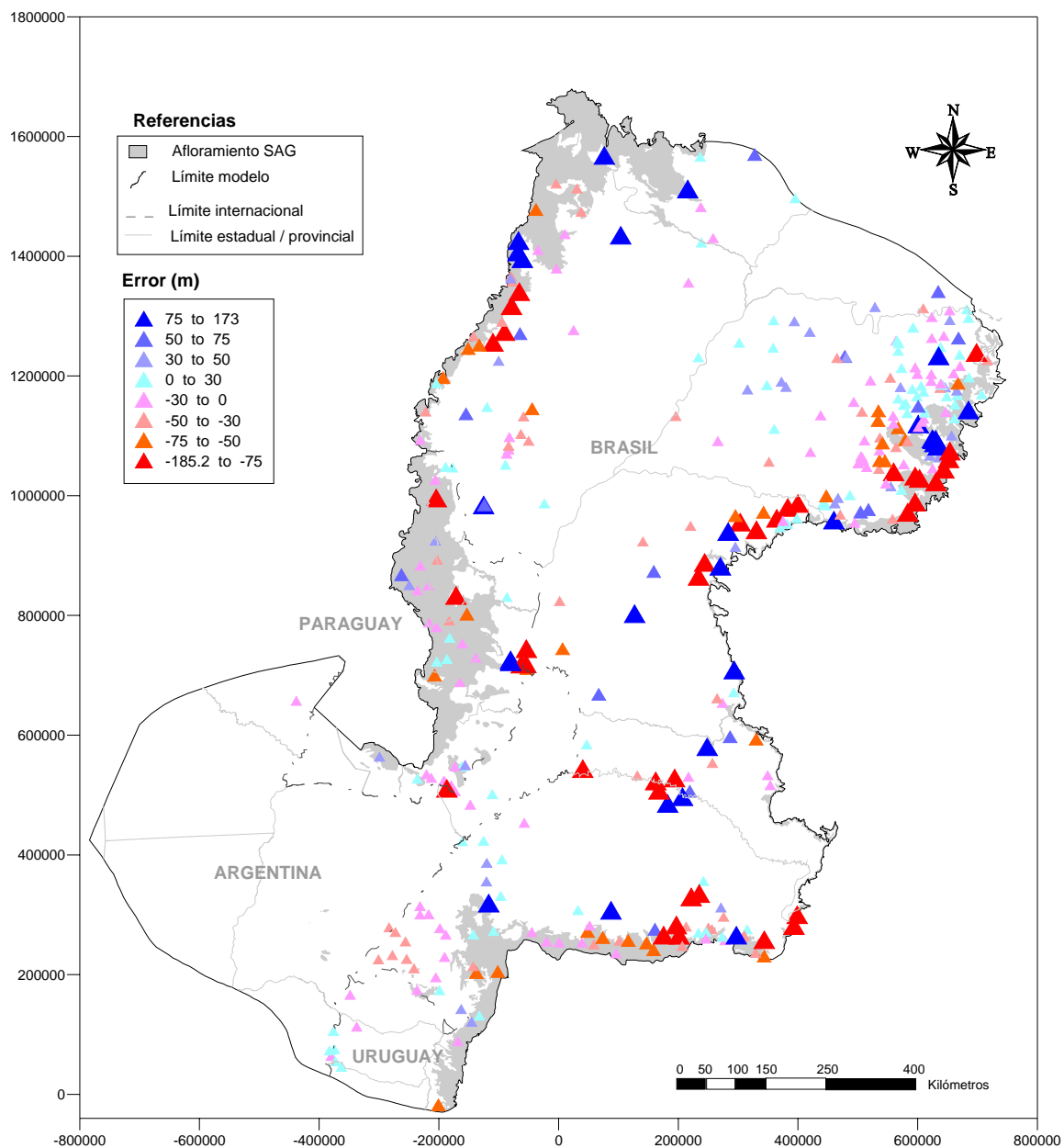
ZONA	K (m/d)	ZONA	K (m/d)
1	5.8	11	8.5
2	22.7	12	10.2
3	4.2	13	13.6
4	7.4	14	4.2
5	4.8	15	2.0
6	4.0	16	22.3
7	8.9	17	26.0
8	5.2	18	154.0
9	1.4	19	0.5
10	20.5		



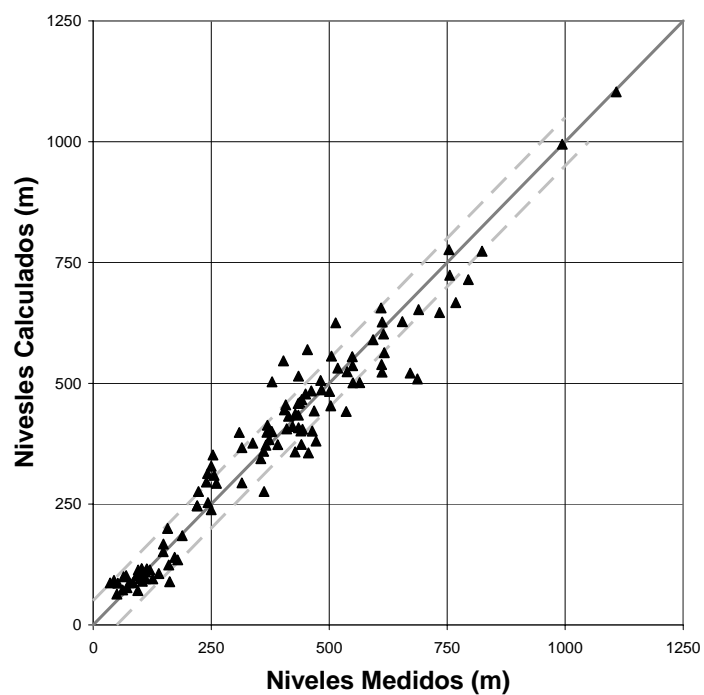
**Figura IV.42** – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5.



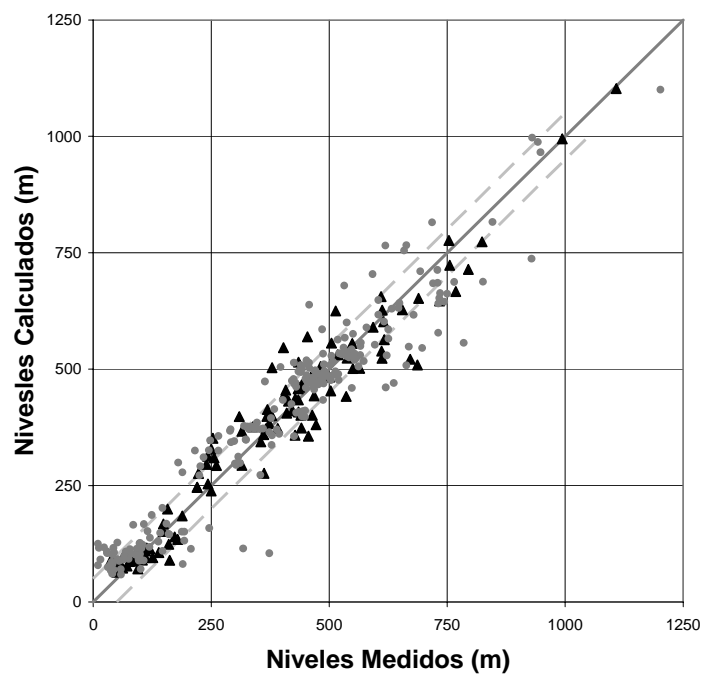
**Figura IV.43** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.44** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5. . El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.45** – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5.



**Figura IV.46** – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5.



**Tabla IV.15 – Balance de masas, Escenario 7. Hipótesis de estructuras en la zonificación de conductividad del escenario 5. Los flujos entrantes son positivos y los flujos salientes son negativos.**

Zona	Recarga		Nivel Fijo		Flujo Prescripto		Goteo	
	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s
1	3756840	43.5			-84452	-1.0	266122	3.1
2	128072	1.5			-69066	-0.8	154356	1.8
3	265171	3.1			-16180	-0.2	2268690	26.3
4	332597	3.8			-50441	-0.6	-64556	-0.7
5	96242	1.1			-61305	-0.7	271022	3.1
6	549121	6.4			-56653	-0.7	-477570	-5.5
7	130836	1.5			-17677	-0.2	1392510	-16.1
8	828324	9.6			-54350	-0.6	-806334	-9.3
9	1051990	12.2			-30977	-0.4	1289850	-14.9
10	318704	3.7			-23015	-0.3	-318724	-3.7
11	204625	2.4			-16957	-0.2	-163139	-1.9
12	678069	7.8			-85605	-1.0	-467981	-5.4
13	952314	11.0			-497027	-5.8	-365451	-4.2
14	0	0.0			-537286	-6.2	-464062	-5.4
15	12525	0.1			-344104	-4.0	-244287	-2.8
16	99441	1.2			-73405	-0.8	-155930	-1.8
17	111825	1.3			-141354	-1.6	-253737	-2.9
18	51419	0.6			-158259	-1.8	-472861	-5.5
19	20131	0.2			-251701	-2.9	22153	0.3
20	177218	2.1			-276167	-3.2	-88098	-1.0
21					653999	7.6	-785166	-9.1
22					1175910	13.6	-55436	-0.6
23							-39341	-0.5
24							-408106	-4.7
25							-140221	-1.6
26							-810493	-9.4
27							-59006	-0.7
28							-173368	-2.0
29							-397796	-4.6
30							-763658	-8.8
31							-106608	-1.2
32							-26105	-0.3
33							-971999	-11.2
34			378615	4.4				
35			-140960	-1.6				
36			-206996	-2.4				
<b>TOTALES</b>	<b>9765465</b>	<b>113.0</b>	<b>30659</b>	<b>0.4</b>	<b>-1016073</b>	<b>-11.8</b>	<b>-8780051</b>	<b>-101.6</b>



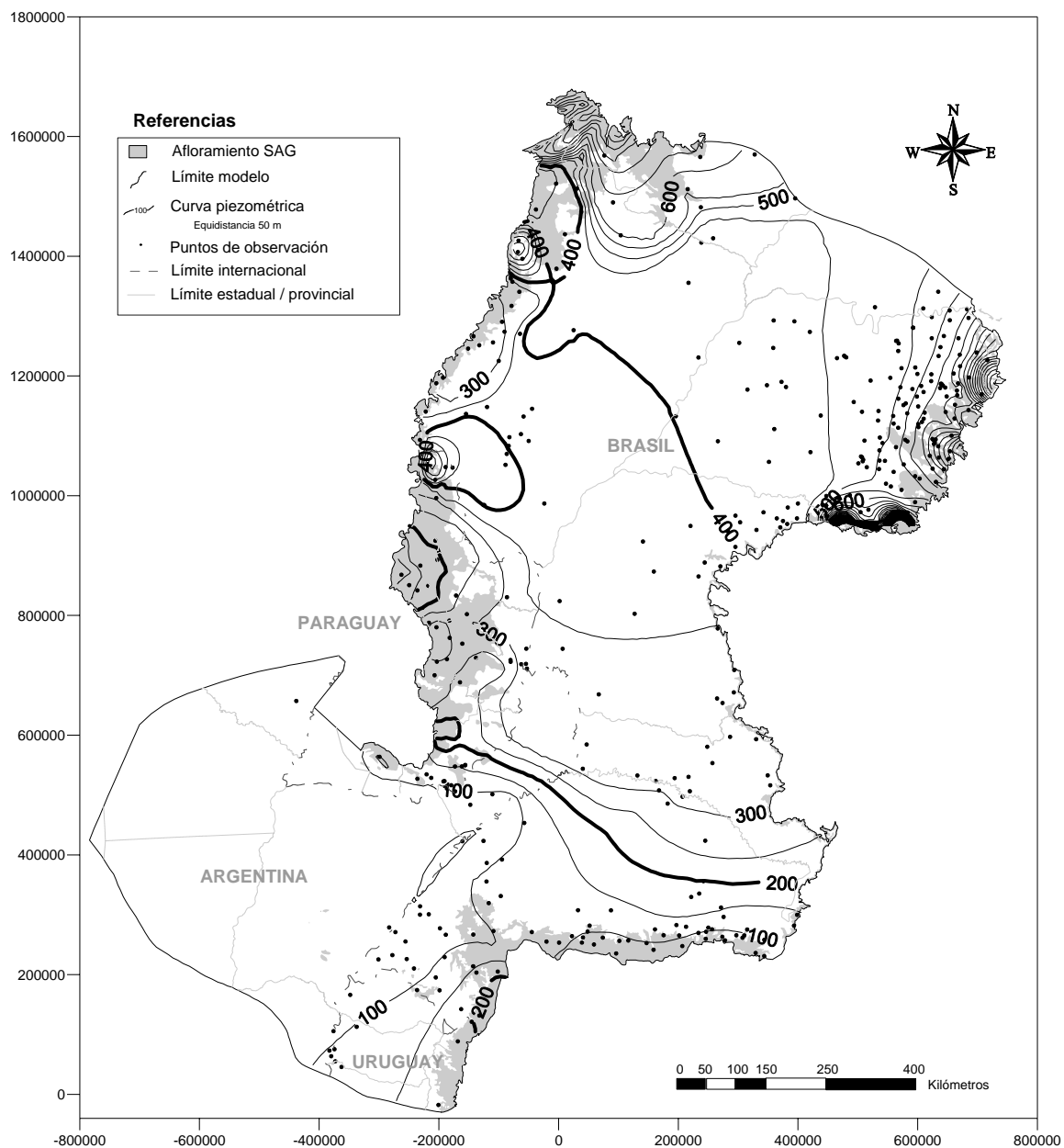
**Tabla IV.16** – Valores calculados de conductividad hidráulica, Escenario 8.

Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)	Zona	K (m/d)
1	0.2	11	3.2	21	7.0
2	28.8	12	20.0	22	0.5
3	75.0	13	0.3	23	13.8
4	12.4	14	35.1	24	23.3
5	0.8	15	2.7	25	9.5
6	0.9	16	75.0	26	18.7
7	18.6	17	5.2	27	83.2
8	19.3	18	48.7	28	0.4
9	5.6	19	113.9	29	87.4
10	20.6	20	75.0	30	19.9
				31	2.2

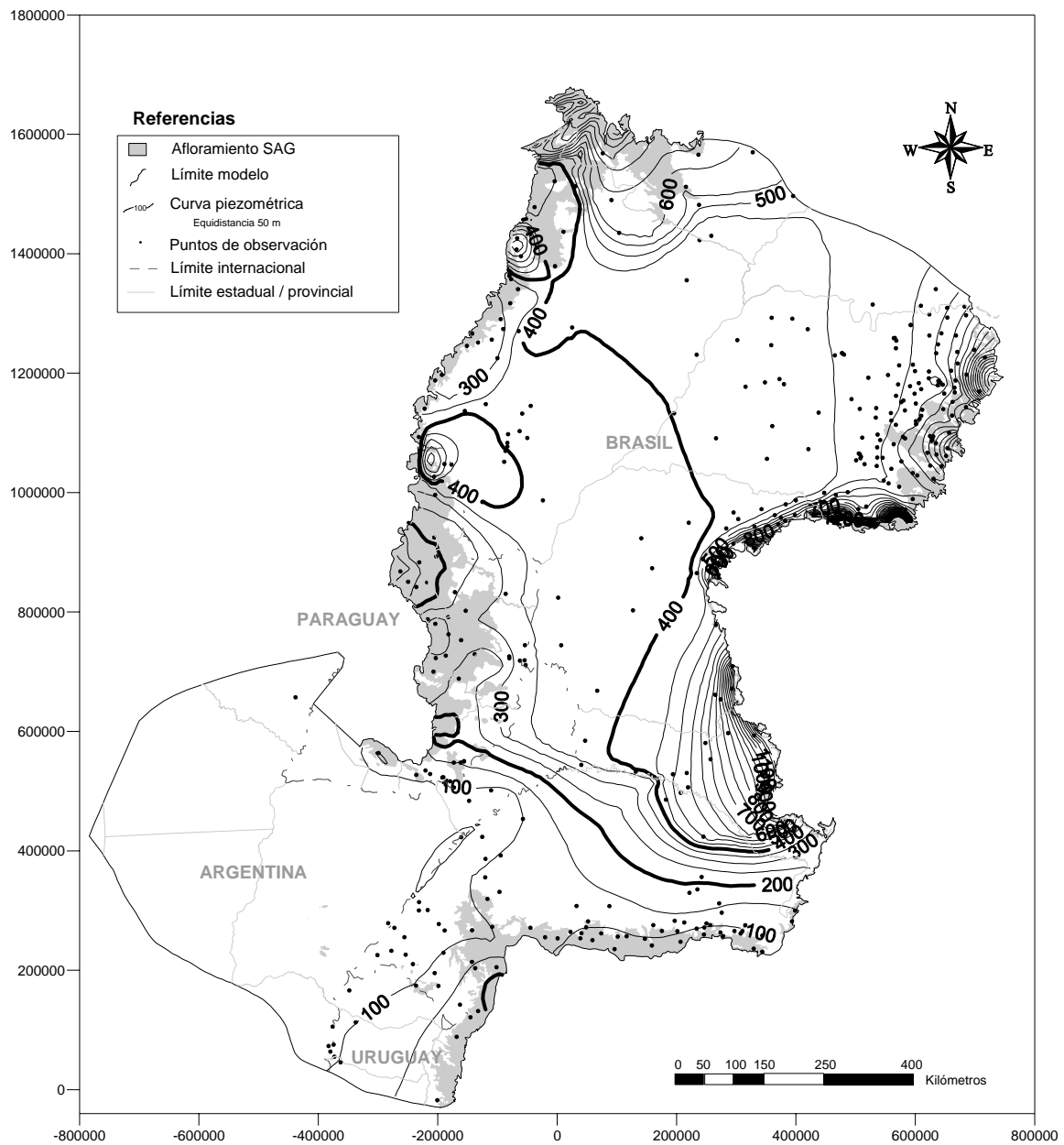
**Tabla IV.17** – Valores calculados de caudal prescripto.

Zona	QF (m/d)
21	0.00034
22	0.00544

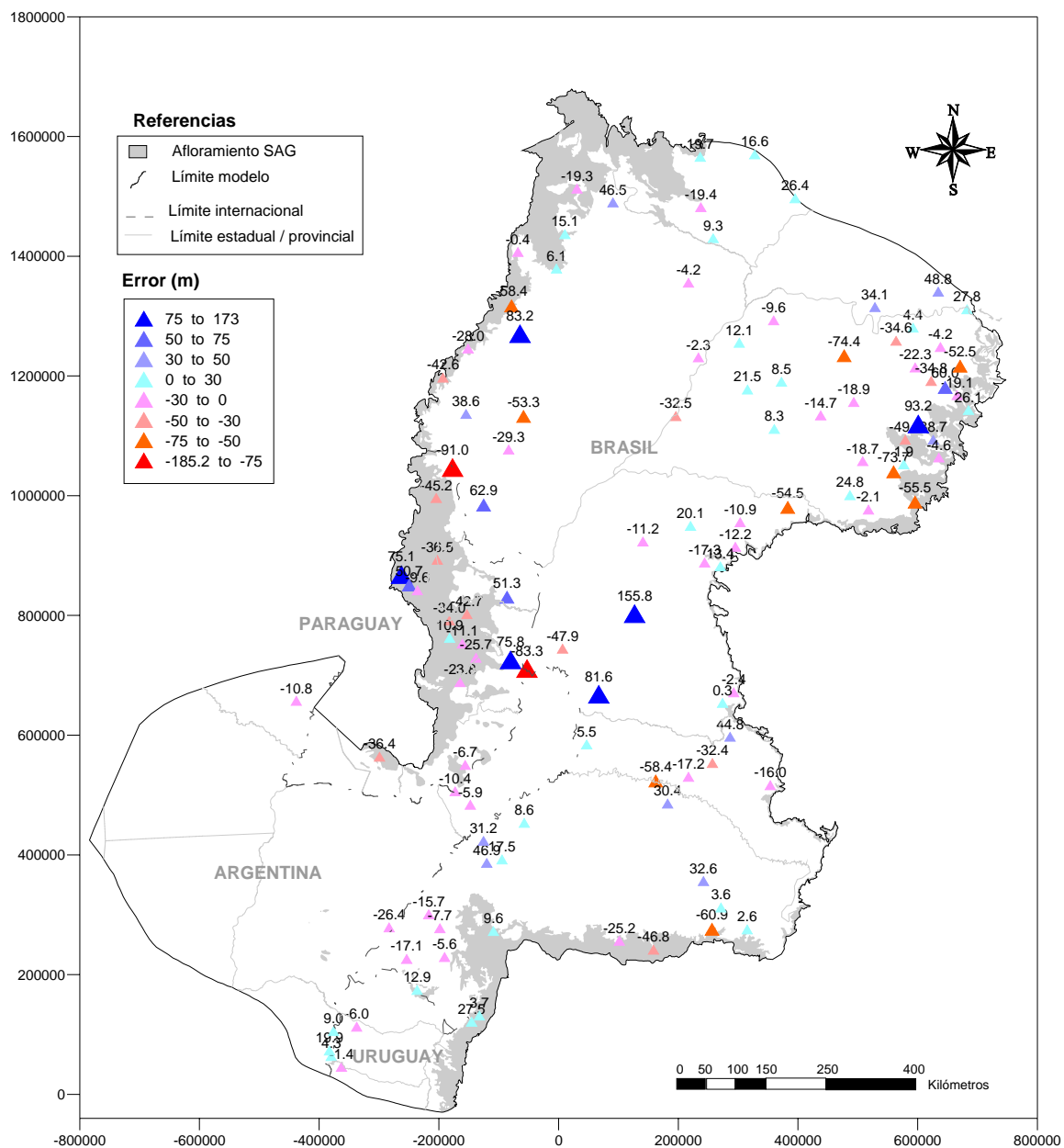




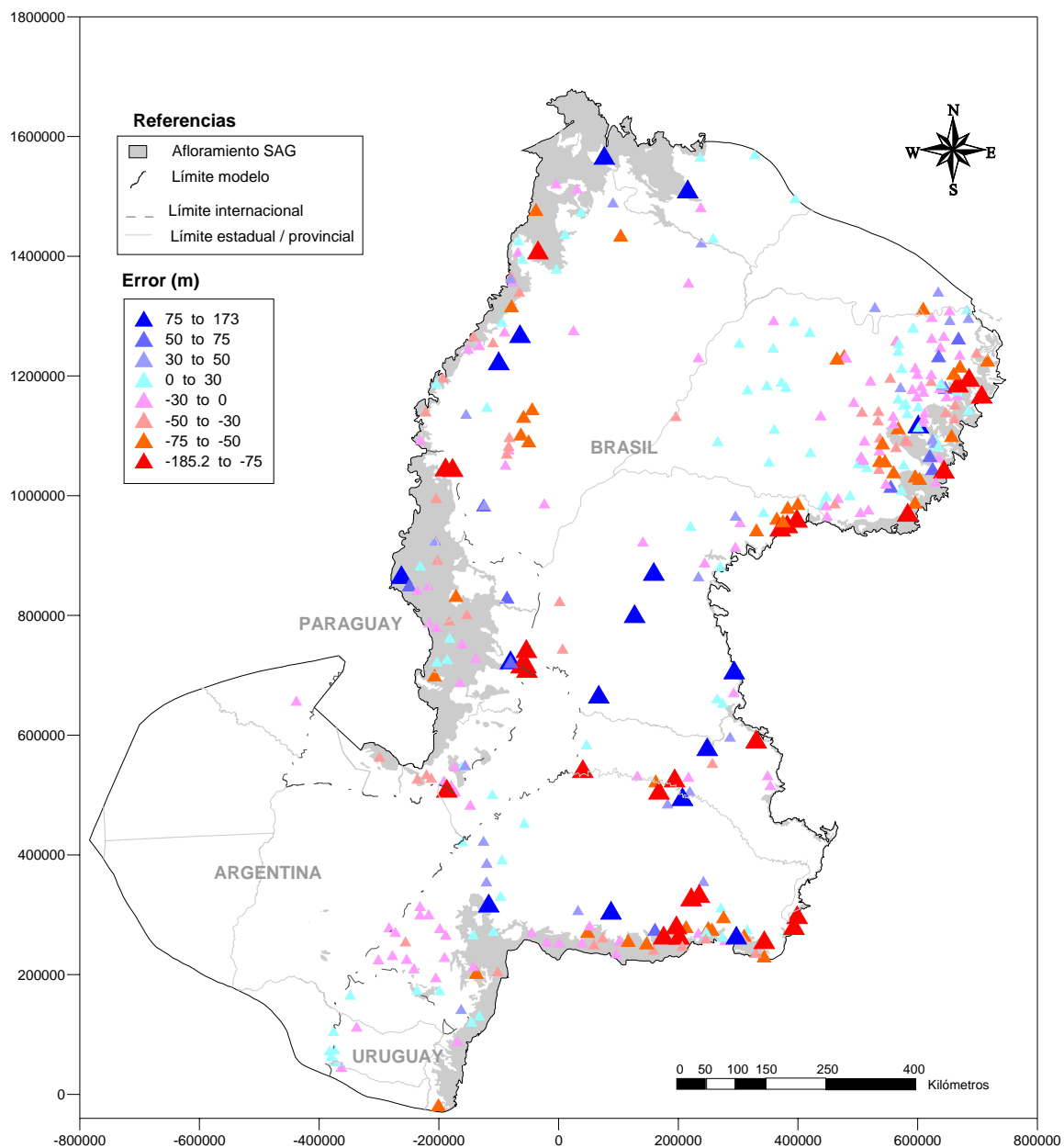
**Figura IV.47** – Mapa de isopiezas calculadas (en metros), Escenario 8, Condición Inicial (Estado Estacionario).



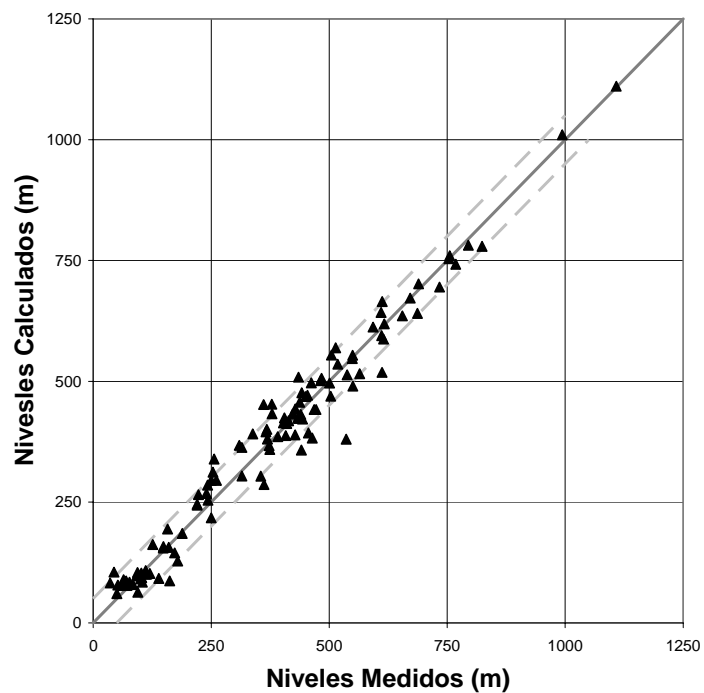
**Figura IV.48** – Mapa de isopiezas calculadas (en metros) para el intervalo de tiempo final, Escenario 8.



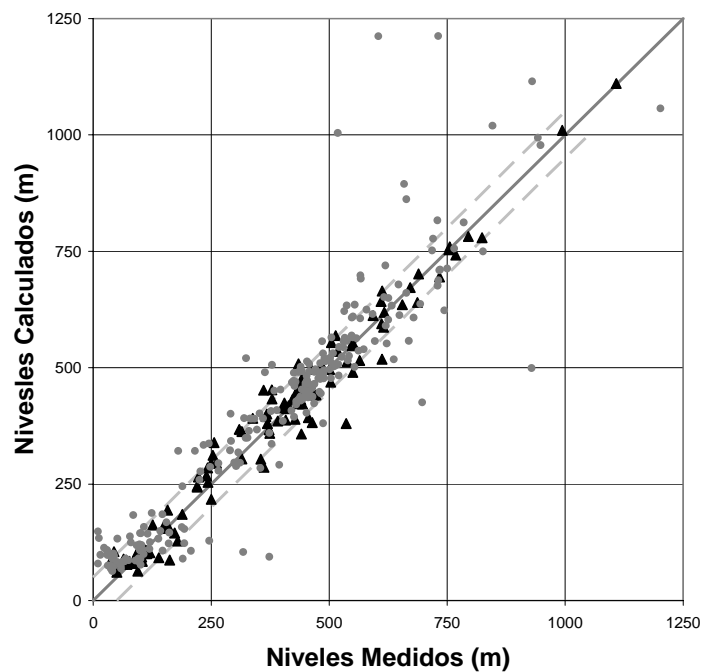
**Figura IV.49** – Mapa de errores en los puntos empleados en la calibración, Escenario 8. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.50** – Mapa de errores en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 8. El error se adopta como nivel medido menos nivel calculado.



**Figura IV.51** – Niveles medidos versus calculados en los puntos de calibración, Escenario 8.



**Figura IV.52** – Niveles medidos versus calculados en todos los puntos de observación de niveles, Escenario 8.



## ANEXO V: ASISTENCIA A REUNIONES O TALLERES

El personal del grupo de modelación asistió a las siguientes reuniones y talleres:

- ✓ Reunión el 7 de junio en Buenos Aires en la Oficina de SNC-Lavalin. Presentación de los adelantos del proyecto SON y SOS.
- ✓ "Tercer Taller de Coordinación de Trabajos Técnicos entre la SG y las empresas". Bauru, Brasil, 21 y 22 de agosto.
- ✓ "II Jornada Acuífero Guaraní" del Estado de São Paulo, Bauru, Brasil, 23 y 24 de agosto 2007.
- ✓ Seminario de "Gestión Integrada de los Acuíferos Transfronterizos" organizado por el Consejo Argentino para las Relaciones Internacionales CARI y el Instituto Argentino de Recursos Hídricos IARH. Buenos Aires, 5 de octubre 2007.
- ✓ "Cuarto Taller de Coordinación Interna del Componente 1 y 6 entre la SG y las empresas". Montevideo, Uruguay, 8 y 9 de octubre de 2007.
- ✓ "Taller Red de Monitoreo del SAG y Conformación de la Red de Monitoreo" organizado por la SG y el Consorcio Guaraní. Montevideo, Uruguay, 10 y 11 de octubre de 2007.
- ✓ Reunión el 2 de noviembre en Buenos Aires en la Oficina de HIDROESTRUCTURAS conjuntamente con el Dr. Nuñez, Ing. Giacosa, Ing. L. Calvo, Dr. Jorge Santa Cruz. y Dr. Veroslavsky. Tema de la reunión: Balance hídrico superficial y avances del informe de climatología.
- ✓ "Taller Bases y Criterios para los Modelos Conceptuales del Sistema Acuífero Guaraní", organizado por la SG y el Consorcio Guaraní. Belo Horizonte- MG- Brasil, 12-13-14 de noviembre de 2007.
- ✓ "II Seminário de Água Subterrânea e Meio Ambiente". Auditorio do CREA-MG, Belo Horizonte- MG- Brasil, 12-13-14 de noviembre de 2007.
- ✓ Reunión Interna de trabajo y Coordinación – componentes 1 y 6 del PSAG, organizado por la SG y el Consorcio Guaraní. 28, 29 Y 30 de enero de 2008 – Montevideo – Uruguay.
- ✓ Reunión del 13 al 16 de Abril en Montevideo entre la SG-SAG y la OIEA (International Atomic Energy Agency).
- ✓ "XXIII Encuentro de Diócesis de Frontera" del 26 a 28 de mayo 2008 en la



ciudad de Concordia donde Luis Vives presentó la ponencia titulada “Modelos Matemáticos - Sistema Acuífero Guaraní”.

- ✓ Reunión interna de trabajo PSAG el 24 al 25 de junio 2008 en Santa Fe en CENEHA-UNL sobre el Modelo hidrogeológico conceptual - Modelo numérico. Asistieron Jorge Santa Cruz y Daniel García (por la Secretaría del SAG); Didier Gastmans (LEBAC-UNESP, Brasil); Luis Vives, Andrea Gómez, Cristian Garabau y Leticia Rodríguez (Grupo de Modelación, Consorcio Guaraní), ver Figura IV-1.



**Figura IV.1.** Reunión interna de trabajo PSAG, junio 2008.

- ✓ “Reunión de modelos organizado por la SG y el Consorcio Guaraní”. 26 y 27 de agosto de 2008 – Montevideo – Uruguay.
- ✓ Reunión Interna de trabajo y Coordinación – componentes 1 y 6 del PSAG, organizado por la SG. 15 y 16 septiembre de 2008 – Montevideo – Uruguay.
- ✓ “Reunión de Elaboración y Coordinación del PEA (UNEPs)” organizado por la SG. 21 y 22 septiembre de 2008 – Montevideo – Uruguay.
- ✓ “Curso de modelación de flujo y transporte en acuíferos: uso del programa VISUAL TRANSIN”. Profesor responsable el Dr. Jesús Carrera Ramírez Investigador del Instituto Jaume Almera de Ciencias de La Tierra, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Barcelona, España. 20 al 24 de octubre de 2008 – Asunción – Paraguay.
- ✓ “11ª Reunión del Consejo Superior de Dirección de Proyecto” organizado por la SG. 03 y 04 de noviembre de 2008– Ribeirão Preto, SP – Brasil.

**“Esta hoja es la cara de atrás del informe - Contratapa”**



GEF



Banco Mundial



OEA

---

Secretaría General del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní  
Edificio Mercosur - Dr. Luís Píera 1992, 2º piso - (CP:11200 ) - Tel/Fax: (598 2) 410 03 37  
e-mail: [sag@sg-guarani.org](mailto:sag@sg-guarani.org) - web: [www.sg-guarani.org](http://www.sg-guarani.org)  
Montevideo - Uruguay

---