

PREMODELO DE FLUJO DEL ACUÍFERO GUARANÍ

Luis Vives¹; Heraldo Campos²; Lucila Candela³ & Luis Guarracino⁴

Resumen - En este trabajo se presenta un modelo preliminar del flujo de aguas subterráneas en el Acuífero Guaraní que permitió la integración de información de distinto origen. Durante la fase de conceptualización del sistema se verificaron y contrastaron diferentes hipótesis de funcionamiento. El presente trabajo pretende contribuir a la planificación de estrategias de protección de las aguas subterráneas y ser una referencia para investigaciones futuras en áreas de mayor complejidad hidrogeológica en las cuencas del Paraná y Chaco-Paraná.

Palabras-claves - modelo numérico, acuífero Guaraní.

INTRODUCCIÓN

El objetivo propuesto inicialmente para este trabajo era simular numéricamente la dinámica del Acuífero Guaraní para disponer de una herramienta para la gestión sustentable de las reservas de aguas subterráneas. Sin embargo, las grandes dimensiones del acuífero junto con la escasa o nula información disponible en ciertas zonas y la poca fiabilidad de algunas mediciones determinaron que el objetivo finalmente propuesto sea el de emplear la modelación numérica como una herramienta para integrar la información disponible y contrastar diferentes hipótesis sobre el funcionamiento del

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras, UNCPB, CC44, 7300 Azul, Argentina. Teléfono-fax 54 2281 432666. lvives@faa.unicen.edu.ar

² Centro de Ciencias Exatas e Tecnológicas. UNISINOS, Av. Unisinos, 950, 93022-000 Sao Leopoldo, RS, Brasil. Fax 51 5908177. heraldo@euler.unisinos.br

³ Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. UPC. Campus Nord, Módulo D2. Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España. Teléfono 34 93 401686. lucila@gauguin.upc.es

⁴ Depto. de Geofísica Aplicada, UNLP. Paseo del Bosque S/n, (1900), La Plata, Argentina. Teléfonos: 54 2214 236563/4 int. 137, Fax: 54-221-4236591. luisg@fcaglp.unlp.edu.ar

acuífero. Por esta razón se prefirió denominar a este trabajo como premodelo aunque por razones de sencillez se referirá en todo el texto al modelo del Acuífero Guaraní.

El área modelada del acuífero tiene una superficie de 902636 km² que abarca territorios de Brasil, Paraguay y Argentina (ver Figura 1).



Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (Campos, 1998a).

Las etapas de modelación realizadas en este trabajo fueron las clásicas: definición del modelo conceptual que permite describir cualitativamente los fenómenos observados; formulación de la estructura del modelo numérico; definición de los elementos del sistema a reproducir; calibración que permitió seleccionar el modelo conceptual más adecuado; y finalmente la validación del modelo.

La organización del trabajo es la siguiente. En primer lugar se describen la estructura del modelo a través de un modelo conceptual recopilado de varias fuentes y el modelo numérico adoptado. La estrategia empleada para la calibración precede a la presentación de los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO

La zona a modelar se muestra en la Figura 2 y corresponde a la región definida por Rocha (1997). Debido a la baja densidad de datos y al escaso conocimiento del funcionamiento hidrogeológico, se resolvió eliminar de la zona de estudio el área de

afloramiento del Cenozoico indiviso al suroeste de la región. De esta forma el modelo queda delimitado por la zona de afloramiento del Acuífero Guaraní (Sur, Este y Oeste); la zona de descarga del acuífero en la región de la ciudad de Torres (Sureste); el comienzo del afloramiento del Cenozoico indiviso (Suroeste); y la zona donde el acuífero desaparece en forma cuña entre el Acuífero Serral Geral y Acuitardo Passa Dois (Norte).

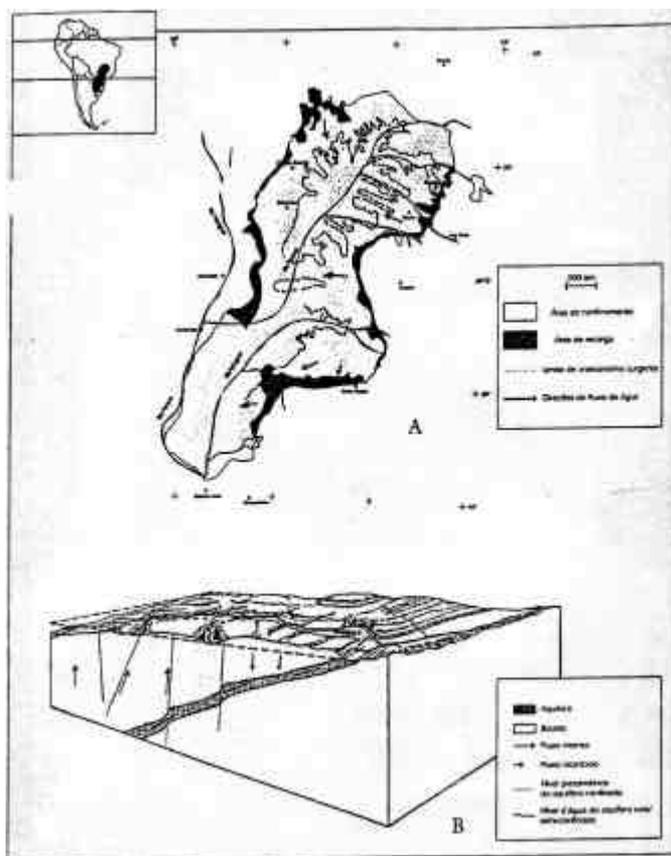


Figura 2. Situación de las áreas de recarga y modelo hidráulico conceptual del Acuífero Guaraní [Rocha (1997), según Rebouças (1976) y DAEE (1979)].

El modelo conceptual del Acuífero Guaraní se definió extrapolando a escala regional la estructura preliminar del modelo conceptual del Estado de Sao Paulo propuesta por Campos (1998a). El Acuífero Guaraní se define como una unidad confinada de areniscas y lamitos con una permeabilidad de 0.2 a 4.6 m/d que disminuye en profundidad debido al aumento de la proporción de arcillas (Campos, 1999b). Las unidades hidrogeológicas que conforman el techo del acuífero son las formaciones Bauru y Serra. La base esta delimitada por las formaciones Passa Dois, Tubarao y Precambrianico.

Basados en los estudios estructurales de Northfleet et al. (1969), Ferreira (1982), Fúlfaro et al. (1982), Zalán et al. (1991) y Araújo et al. (1995 y 1999), el Acuífero Guaraní presenta lineamientos estructurales (aulacógenos) que condicionan el flujo subterráneo.

En algunas zonas estos lineamientos actúan como conductos preferenciales de flujo (similar a una fractura) y en otras se manifiestan como una anisotropía en la permeabilidad (fracturación de menor densidad y más distribuida espacialmente).

Las principales entradas de agua al sistema son las recargas por infiltración directa en territorio brasileño distribuidas espacialmente a lo largo de las zonas de afloramientos en los estados de Sao Paulo, Goias, Mato Grosso do Sul, Paraná y Santa Catarina.

Las áreas de descarga natural del acuífero están localizadas en las regiones de planicies y pantanos ubicadas entre los ríos Uruguay y Paraná; al Sur y Este de la región de Porto Alegre y a lo largo de los ríos Paraná, Pelotas y Tietê, condicionadas por los lineamientos estructurales. Otra salida de agua del acuífero se debe a la explotación de pozos distribuidos en la región Centro-Oeste del Estado de Sao Paulo, con una área de sobreexplotación alrededor de la ciudad de Ribeirao Preto.

MODELO NUMÉRICO

El modelo de flujo sólo simula el Acuífero Guarani. La malla de elementos finitos es bidimensional. El régimen temporal es estacionario. Se emplea el sistema de coordenadas UTM y las unidades en que se trabaja son homogéneas, metros y días.

La simulación numérica se ha realizado con el código TRANSIN II (Medina et al., 1996), que permite simular el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos. Además, este código tiene la excelente ventaja de permitir la estimación automática de todos los parámetros de flujo y/o transporte (transmisividad, difusión, porosidad, etc) a partir de valores medidos de niveles y/o concentraciones. 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). Para el preproceso y postproceso de este código se utilizó el INTRANSIN-III (Vives, 1994).

DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

La construcción de la malla de elementos finitos se realizó automáticamente, mediante el código de generación de mallas 2DUMG (Bugada, 1990). La Figura 3 presenta la malla de elementos finitos superpuesta con la referencia geográfica de los países. La discretización de la malla es más fina en las zonas de mayor gradiente hidráulico y/o de mayor densidad de datos como puede observarse en zona noreste del modelo (Estado de Sao Paulo). También se observa que el tamaño de los elementos

aumenta con suavidad al alejarse de estas zonas y acercarse a regiones con gradiente hidráulico bajo y/o poca densidad de medidas.

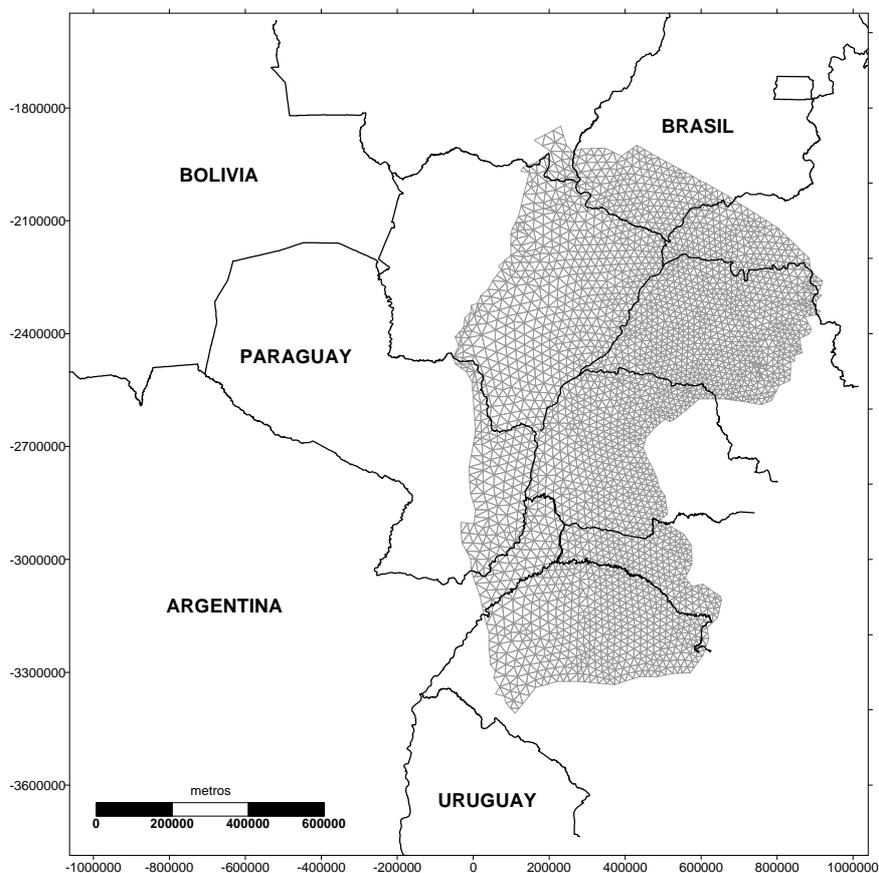


Figura 3. Malla de elementos finitos del Acuífero Guaraní, con referencias geográficas. La malla tiene 2846 nudos, 54230 elementos triangulares de tres nudos y 304 elementos unidimensionales. La malla básica se ha modificado a lo largo de los lineamientos estructurales (aulacógenos), mediante la superposición de elementos unidimensionales que conectan los nodos de ese contorno (coincidentes con aristas de los elementos triangulares) que permiten modelar las direcciones preferenciales de flujo.

ZONIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN PREVIA DE LOS PARÁMETROS DE FLUJO

El área de estudio se particionó en 14 zonas de distinta transmisividad y se definieron 6 zonas de con diferentes permeabilidades (Figura 4 y Tabla 1). La zonificación de la transmisividad permite simular los lineamientos estructurales que trabajan como vías preferentes de flujo en tanto que la zonificación de la permeabilidad permite describir áreas afectadas por lineamientos estructurales de poca intensidad (fracturación secundaria).

Las zonas de permeabilidad se simulan con los elementos triangulares. La definición de la geometría de estas zonas se ha realizado teniendo presente el grado de fracturación

secundaria y algunos lineamientos principales (por ejemplo el de Loanda, coincidente con el Río Paraná) a partir del trabajo de Araújo et al. (1995). La fracturación secundaria es simulada conjuntamente con la matriz por lo que estas zonas son tratadas como anisótropas. El tensor de anisotropía tiene la dirección de NNE-SSW, coincidente con el lineamiento de Loanda. Para poder incluir el efecto de la anisotropía en el modelo se procedió a rotar la malla de modo que la dirección de la anisotropía coincida con el eje de ordenadas.

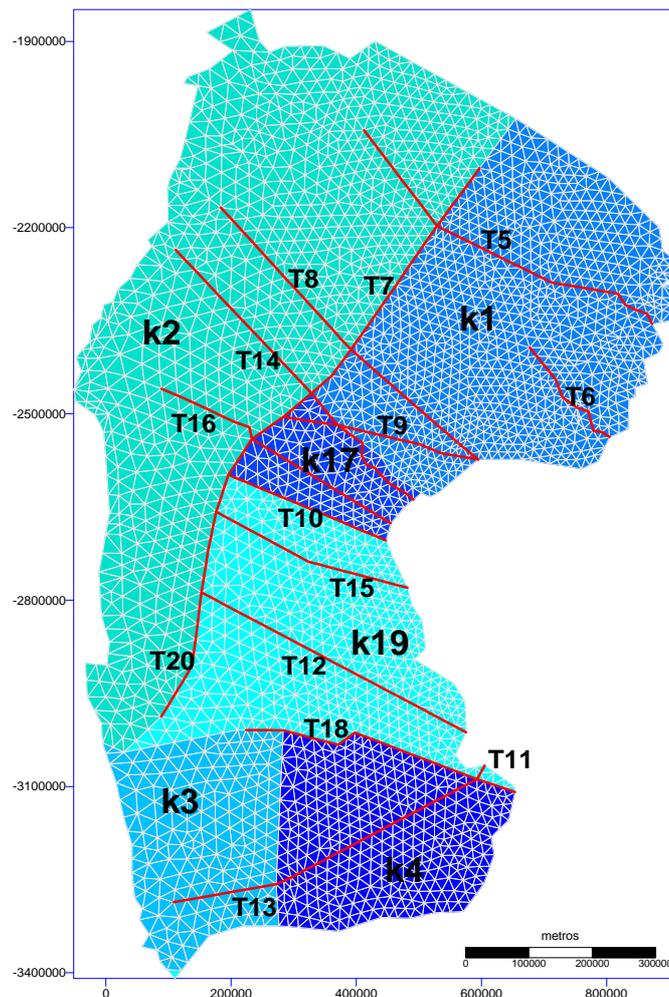


Figura 4. Distribución de zonas de permeabilidades (K) y transmisividades (T).

Las zonas que simulan los conductos preferentes de flujo (alaucógenos) se han tratado mediante elementos unidimensionales. En estas zonas el parámetro utilizado para representar este fenómeno es la transmisividad que se calcula utilizando el ancho de esos conductos. Para la definición de las trazas de estos conductos y de sus anchos se empleó el trabajo de Ferreira (1982).

El valor de los parámetros de permeabilidad y transmisividad es modificado en cada elemento a través de un coeficiente que incluye el efecto de la variación espacial del

espesor del acuífero y del cambio de la viscosidad del agua por la variación de la temperatura. El factor que corrige la permeabilidad de acuerdo a la temperatura, se obtiene de la formula de Schneebeli (1966) citado por Custodio y Llamas (1976).

Zonas	Descripción	Tipo de parámetro	Transmisividad (m ² /d)	Permeabilidad K1 (m/d)	Permeabilidad K2 (m/d)
K1	Zona superior-Este	K		1	3
K2	Zona superior-Oeste	K		25	10
K3	Zona inferior-Oeste	K		1	3
K4	Zona inferior-Este	K		3	1
T5	Río Verde	T	500000		
T6	Río Tieté	T	500000		
T7	Falla Loanda (aguas arriba)	T	100000		
T8	Río Guapiara	T	200000		
T9	Río Paranapanema	T	1000000		
T10	Río Piquiri	T	1000000		
T11	Río Uruguay (aguas arriba)	T	100000		
T12	Río Iguazú	T	100000		
T13	Falla Blumenau	T	200000		
T14	Falla San Gerónimo	T	200000		
T15	Río Alonso	T	200000		
T16	Río Candido Abreu	T	100000		
K17	Arco de Punta Grossa	K		5	1
T18	Río Uruguay (aguas abajo)	T	500000		
K19	Zona medio-Este	K		1	
K20	Falla Loanda(aguas abajo)	T	100000		

Tabla 1: Contiene las zonas de transmisividad (T) y permeabilidad (K), con la estimación previa. K1 es la permeabilidad en la dirección paralela al lineamiento de Loanda, la K2 es la dirección perpendicular.

La recarga areal (por elementos) se define como una columna de agua que entra o sale de la zona. En nuestro modelo, la recarga es la resultante entre el volumen de agua que entra (por precipitación o recarga del acuífero superior) menos el que sale por las extracciones realizadas por los pozos de explotación.

La infiltración proveniente de la precipitación, para la zona de afloramiento del Acuífero Guaraní, se ha estimado en un 10% de la misma (Rebouças, 1976). La precipitación media anual en la región varía entre 1300 y 1800 mm.

Se conoce desde hace más de dos décadas una sobreexplotación del acuífero en la región de Ribeirao Preto (Sao Paulo, Brasil) con valores de caudales de $45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ (Gilboa et al., 1976). Los resultados obtenidos del estudio hidrogeoquímico e isotópico de los acuíferos Bauru y Guaraní (Kimmelman et al., 1996) han mostrado que las aguas subterráneas no pertenecen a un único acuífero posiblemente como consecuencia de una alta tasa de bombeo. Existe indicios de la penetración de aguas someras a niveles profundos donde se mezclan aguas geotermales. La explotación del acuífero (Campos y Cerón-García, 1998) se realiza mediante el bombeo de aproximadamente 1.000 pozos situados en su gran mayoría en las áreas donde la potencia de los basaltos son menores. Los caudales medios se estiman entre 3 y 28 l/s, sin embargo pueden encontrarse algunas decenas de pozos con profundidades próximas a los 1.000 m y caudales comprendidos entre 80 y 170 l/s.

La recarga se dividió en 7 zonas (Figura 5 y Tabla 2). En las zonas donde el Acuífero Guaraní aflora la recarga es controlada sólo por un porcentaje de la precipitación que infiltra (zonas R5 y R6) con excepción de la zona R2 donde además se debe incluir la explotación. En las zonas R3, R4 y R7, todas dentro del Estado de Sao Paulo, la recarga es negativa porque se tiene en cuenta las extracciones que se realizan en los acuíferos Bauru (con 12000 pozos que explotan $9 \text{ m}^3/\text{s}$) y Serra Geral (con 3000 pozos que explotan $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$).

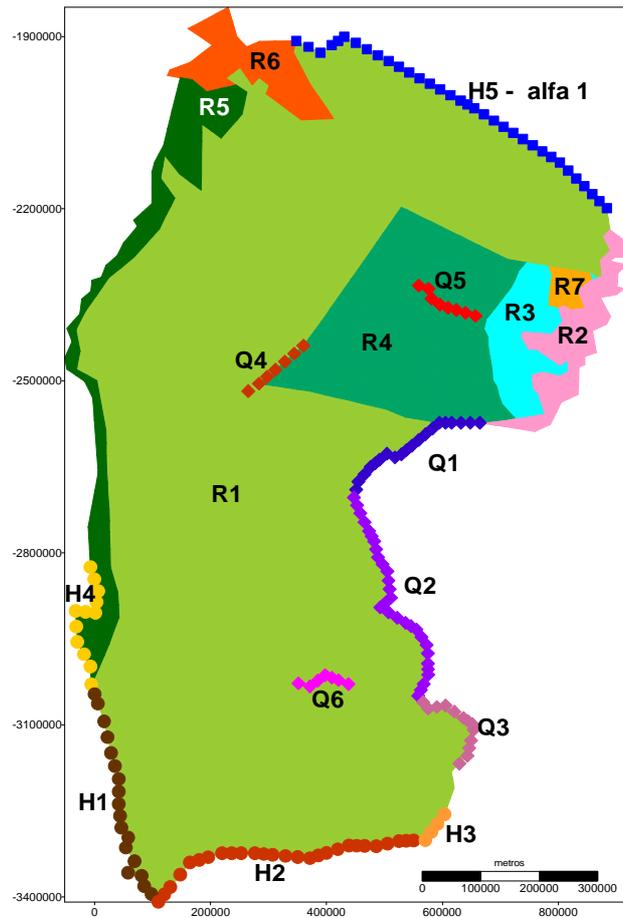


Figura 5. Distribución de zonas de recarga y zonas de condiciones de contorno.

Zonas	Descripción	Área (km ²)	Nro. de pozos de bombeo	Caudal medio de explotación (m ³ /h/pozo)	Estimación previa (m/d)
R1	Sin recarga del Basalto	700466			0.00E+00
R2	Zona noreste	20693	200	30	3.49E-04
R3	Zona noreste (ext. Medio)	20728	700	100-150	-6.54E-05
R4	Zona noreste (ext.conf.)	96039	100	300	-6.75E-06
R5	Zona noroeste (inferior)	39553			3.56E-04
R6	Zona noroeste (superior)	21032			5.00E-04
R7	Zona Ribeirao Preto	4123	83	10817	-2.99E-05

Tabla 2: Características de las zonas de recargas.

La fuente de información para los datos de explotación de las zonas R2, R3 y R4 resulta de una comunicación personal (1999) de Gerôncio Alburque Rocha y José Eduardo Campos do Departamento de Aguas e Energia Elétrica do Estado de Sao Paulo (DAEE). En cambio, los datos para la ciudad de Ribeirao Preto fueron obtenidos del Departamento de Águas e Esgostos de Ribeirao Preto (DAERP).

Las condiciones de contorno en los límites de la zona de estudio se muestran en la Figura 5. Se han fijado condiciones de nivel fijo en los límites Oeste (zona de Paraguay y del afloramiento del Cenozoico indiviso en Argentina), Sur (afloramiento del Guaraní) y Sureste (zona de Torres); de caudal fijo en el límite Este (zona de afloramiento del Guaraní en los estados de Mato Grosso do Sul, Paraná y Santa Catarina) y condición mixta en la cara Norte de la zona modelada, donde el acuífero termina acuñándose hasta desaparecer

Las condiciones de contorno de nivel fijo pueden corresponder a un valor constante de nivel o variar espacialmente (Tabla 3). En las zonas H2 y H3 se adoptó un valor constante del nivel piezométrico. En cambio en las zonas H1, H4 y H5 los valores de los niveles son variables, adoptándose como parámetro la unidad y como coeficiente del nodo el valor interpolado del mapa de isopiezas propuesto por Araújo et al. (1999), ver Figura 6.

Zonas	Descripción	Nivel (m)
H1	Nivel afloramiento del Cenozoico indiviso	1
H2	Nivel afloramiento del Guaraní en el Sur	200
H3	Nivel en la zona de Torres	200
H4	Nivel en la zona de Paraguay	1
H5	Nivel en zona norte (entrada)	1

Tabla 3: Descripción de las zonas de niveles fijos. El valor unitario de nivel fijo es porque el mismo varia nudo a nudo.

Las zonas de entrada a través de los afloramientos del Guaraní en el contorno este, son simuladas con una condición de caudal fijo (zonas Q1, Q2, y Q3 de la Tabla 4). Esta forma de simular la recarga producida por la infiltración del agua de precipitación, en lugar de incluirla como una zona de recarga areal, es porque el ancho de esta franja es muy reducido y condicionaría la generación de la malla con elementos triangulares muy malos. El parámetro de estas zonas es el valor de volumen recarga de precipitación por unidad de longitud. El ancho de la área aflorante se adopta de 12.5 km para las tres zonas y el volumen recargado se ha estimado en un 10% de la precipitación (Rebouças, 1976). El coeficiente de nudo son las longitudes medias entre nudos sucesivos.

Zonas	Nombre	Información Previa (m ³ /d/m)	Longitud de la zona (m)
Q1	Entrada zona superior	6.164	266781.27
Q2	Entrada zona medio	6.164	411278.19
Q3	Entrada zona inferior	6.164	177110.49
Q4	Salida lineamiento Paraná	-1	
Q5	Salida lineamiento Pelotas	-1	
Q6	Salida lineamiento Tietê	-1	

Tabla 4: Descripción de las zonas de caudal fijo.

Las salidas a lo largo de los ríos Paraná, Pelotas y Tietê, condicionadas por los lineamientos estructurales, son simuladas por una condición de contorno de caudal fijo. Las zonas de caudal fijo Q4, Q5 y Q6 tienen como parámetro la unidad y el coeficiente de nudo tienen $100000 \text{ m}^3/\text{d}$ repartidos proporcionalmente en todos los nudos de la zona. La estimación previa es compatible con los datos caudal de los flujos superficiales.

DATOS EMPLEADOS EN LA CALIBRACIÓN

Los niveles medidos en una serie de puntos son parte de los datos que requiere el programa. Estos puntos son los “puntos de observación”, que coinciden con los pozos en que se dispone de medidas. El número de puntos de observación que se emplearon en este modelo es de 74 (Figura 6), seleccionados de modo que estén distribuidos espacialmente de forma homogénea y que sean compatibles con el mapa de isopiezas propuesto por Araújo et. al (1999).

Algunas de las medidas observadas presentan particularidades que conducen a dudar de su fiabilidad: los días de la toma de la medición no coinciden, la zona de admisión es mayor que el espesor del acuífero (la zona de basalto no está encamisada), pozos parcialmente penetrantes, no se tiene certeza que los niveles medidos sean estáticos, etc. Por ello se asignaron unos coeficientes de ponderación a los datos de nivel, son las inversas de las desviaciones típicas, para valorar su fiabilidad

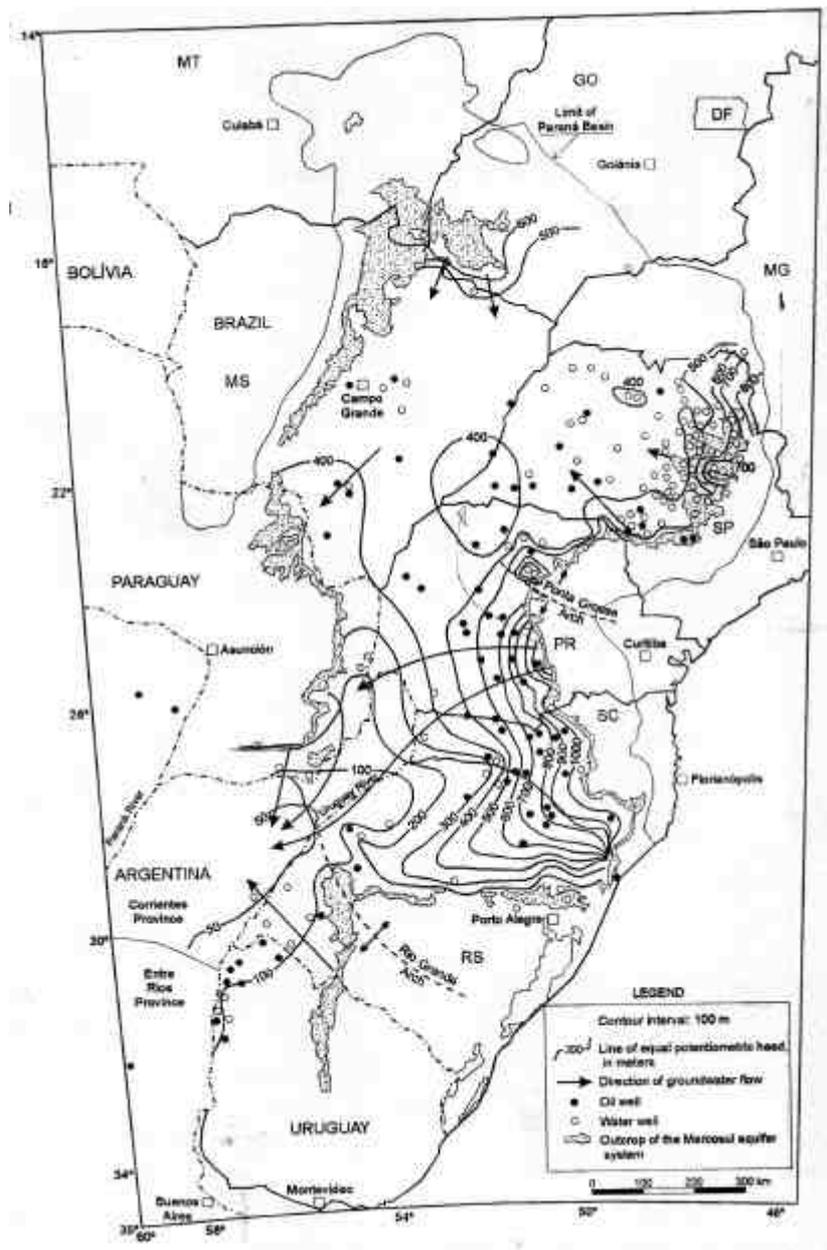


Figura 6. Mapa de isopiezas del Acuífero Guaraní (Araújo et al., 1999, correspondiente a varios periodos de medición).

ESTRATEGIA DE LA CALIBRACIÓN

El proceso de calibración consiste en estimar los parámetros del modelo, de forma que la respuesta del mismo en términos de niveles se ajuste a los valores medidos. Al mismo tiempo, los parámetros calculados deben ser coherentes con sus estimaciones previas y con el conjunto del modelo conceptual.

Se estimaron casi todas las zonas de conductividad y transmisividad, todas las de recarga y de caudales fijos. No se estimó ninguna zona de nivel fijo y coeficiente de goteo.

Durante la fase de calibración, se impuso como primer objetivo que la piezometría calculada reproduzca cualitativamente las formas del mapa de isopiezas de la Figura 6. De esta manera se podían analizar críticamente la validez de las medidas observadas.

- .se comprobó la necesidad de incluir los lineamientos estructurales y de tratar las zonas de permeabilidad como anisótropas, a causa de la fracturación secundaria;
- .el análisis de los residuos puso de manifiesto la necesidad de modificar algunas zonificaciones de permeabilidad y el trazado de los lineamientos;
- .se comprobó la necesidad de incluir en el modelo las zonas de fuertes extracciones que se realizan en los acuíferos superiores al Acuífero Guaraní en la zona del Estado de Sao Paulo (Formaciones Bauru y Serra Geral).

RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la calibración, cuyo ajuste puede ser considerado como aceptable y responde satisfactoriamente los objetivos propuestos, aunque existen una serie de aspectos no representados adecuadamente que serán tratados en el siguiente apartado.

Analizando el ajuste por los errores obtenidos en cada uno de los puntos de observación, entendiendo como error la diferencia entre el valor piezométrico medido y el calculado por el programa, se puede decir que se ha obtenido una desviación típica media de los residuos de 30 m, que es un valor aceptable.

La Figura 8 contiene la piezometría calculada por el programa junto con las medidas observadas en los distintos puntos de observación. En ella se puede observar como se reproducen cualitativamente las formas de las isopiezas de la Figura 6 (Araújo et. al, 1999), cumpliendo uno de los objetivos propuestos. También se puede observar como el flujo subterráneo esta influenciado por los lineamientos estructurales de mayor o menor identidad (alaucógenos) y por las recargas (especialmente en la zona del Estado de Sao Paulo). Asimismo, se puede observar que en la mitad Sureste del modelo no se reproducen correctamente, pero esta situación queda justificada por las escasas informaciones disponibles y porque el trazado de las isopiezas en esa región contiene una mayor subjetividad.

En la Tabla 5 se han representado los valores de todos los parámetros estimados y los resultantes de la calibración. Los parámetros calculados son en general coherentes con el modelo conceptual propuesto y con las estimaciones previas, a excepción de la recarga. Los valores de permeabilidad estimados inicialmente no difieren de los calculados por el programa, están dentro del mismo orden de magnitud y además mantienen la misma relación de anisotropía. Las transmisividades obtenidas para los lineamientos estructurales tienen una mayor incertidumbre, producto de que en el cálculo

de la información previa sólo se pudo definir el ancho de estos elementos, pero del valor de permeabilidad no se tenía información (se adoptó un valor constante para todas estas estructuras de 10 m/d).

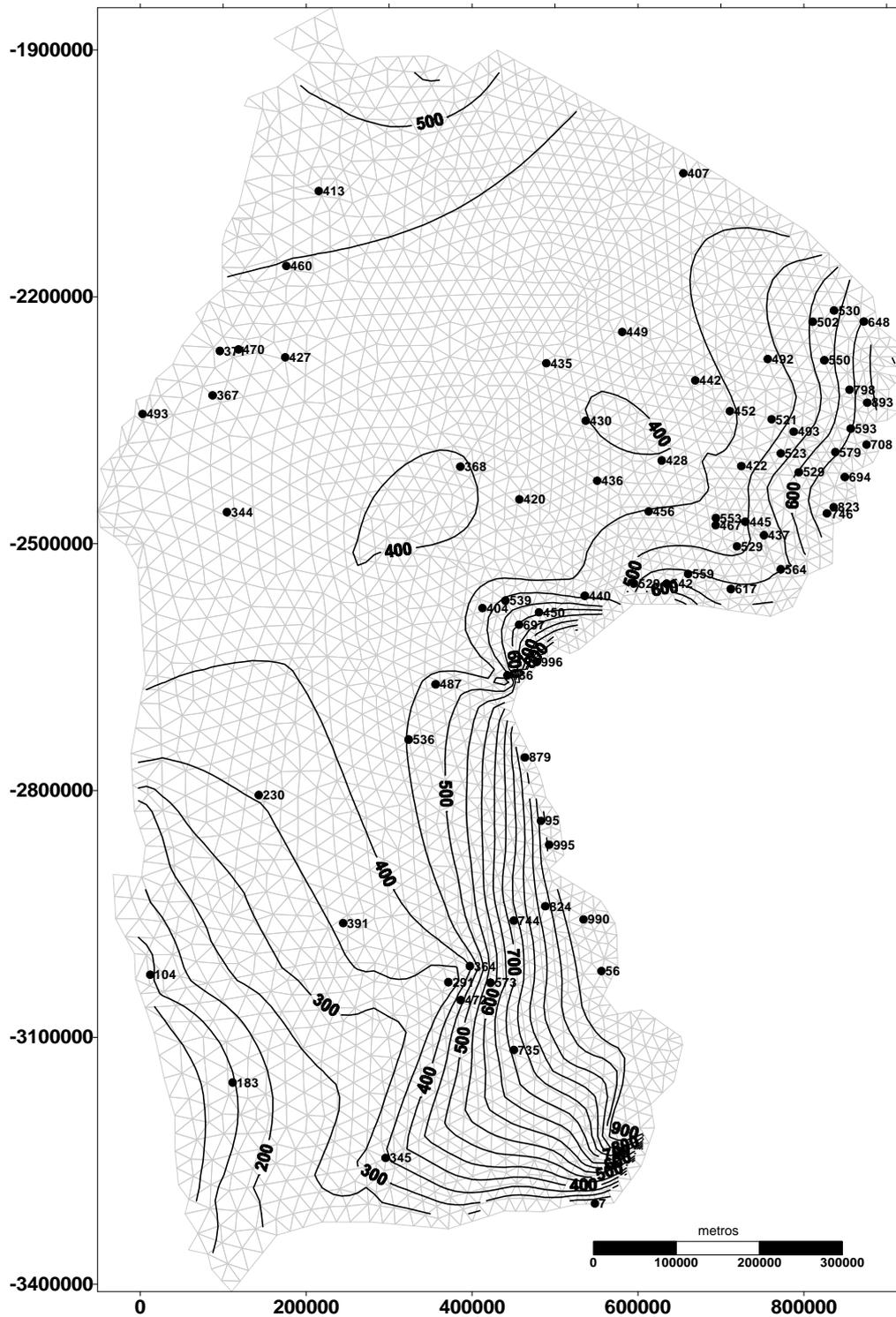


Figura 8. Isoplezas calculadas en la simulación.

La recarga en las zonas de afloramiento del Guaraní (R2, R5 y R6) se reduce, lo que hace suponer que la estimación del porcentaje de infiltración de la precipitación es

elevado y que además en las zonas situadas al Este puede existir una explotación del acuífero que no se está contemplando. La disminución de la recarga en la zona R4 es esperable ya que la explotación simulada se produce en los acuíferos provocando haciendo con que el Acuífero Guaraní entregue parte de su reserva. Por otro lado, se justifica también la necesidad de incluir la sobreexplotación de Ribeirao Preto (zona R7), pero parece ser esta mayor que se la estimo a priori.

En la Tabla 6 se presenta el balance estacionario de entradas y salidas del modelo. Se puede observar que todas las salidas del sistema se realizan a través de todas las zonas de nivel fijo, de las descargas de los lineamientos (Paraná, Pelotas y Tietê) y de las zonas de explotación del Estado de Sao Paulo. De ellas destacan por su magnitud y escaso control (no se tienen información para contrastarla) la zona de nivel fijo H4 y las zonas de caudal fijo Q4 y Q5. Las entradas al sistema se producen por las zonas de afloramiento (R2, R5, R6, Q1, Q2 y Q3). La recarga en R1, que se propone nula, es una condición que se deberá tratar con más rigor, pero ello requiere la inclusión en la modelación de los acuíferos superiores, donde además se podrá determinar la región de artesianismo del Acuífero Guaraní.

Número de zonas	Recarga	Nivel fijo	Caudal fijo	Goteo
1	0.0000	-0.6995	1.0522	0.5030
2	1.3469	-0.1258	2.3080	
3	-0.8001	-0.0109	0.3542	
4	-0.0413	-1.0714	-1.5325	
5	0.2306		-0.3653	
6	0.0980		-0.9959	
7	-0.2500			
Total	0.5841	-1.9077	0.8206	0.5030

Tabla 6. Balance del modelo (hm³/d). Los valores positivos son de entrada y los negativos de salida.

Zona	Nombre	Tipo de parámetro	Estimación Previa	Valor Calculado	Opción de estimación
K1	Zona superior-Este	K1	1	2.02	Si
		K2	3	4.20	Si
K2	Zona superior-Oeste	K1	25		
		K2	10		
K3	Zona inferior-Oeste	K1	1	2.38	Si
		K2	3	0.17	Si
K4	Zona inferior-Este	K1	3	0.49	Si
		K2	1	0.04	Si
T5	Río Verde	T	500000	23340	Si
T6	Río Tieté	T	500000	1159000	Si
T7	Falla Loanda (aguas arriba)	T	100000	98710	Si
T8	Río Guapiara	T	200000	489500	Si
T9	Río Paranapanema	T	1000000	11490000	Si
T10	Río Piquiri	T	1000000	185200	Si
T11	Río Uruguay (aguas arriba)	T	100000	349000	Si
T12	Río Iguazú	T	100000	52080	Si
T13	Falla Blumenau	T	200000	377800	Si
T14	Falla San Gerónimo	T	200000	50950	Si
T15	Río Alonso	T	200000	51740000	Si
T16	Río Candido Abreu	T	100000	69490	Si
K17	Arco de Punta Grossa	K1	5	1.49	Si
		K2	1	0.31	Si
T18	Río Uruguay (aguas abajo)	T	500000	39700	Si
K19	Zona medio-Este	K	1	8.32	Si
K20	Falla Loanda(aguas abajo)	T	100000	233900	Si
R1	Sin recarga del Basalto	Recarga	0.		
R2	Zona noreste	Recarga	3.49E-04	6.51E-05	Si
R3	Zona noreste (ext. medio)	Recarga	-6.54E-05	-3.86E-05	Si
R4	Zona noreste (ext.conf.)	Recarga	-6.75E-06	-4.30E-07	Si
R5	Zona noroeste (inferior)	Recarga	3.56E-04	5.83E-06	Si
R6	Zona noroeste (superior)	Recarga	5.00E-04	4.65E-06	Si
R7	Zona Ribeirao Preto	Recarga	-2.99E-05	-6.06E-05	Si
Q1	Entrada zona superior	Caudal Fijo	3.000	3.944	Si
Q2	Entrada zona medio	Caudal Fijo	6.164	5.611	Si
Q3	Entrada zona inferior	Caudal Fijo	2.000		
Q4	Salida lineamiento Paraná	Caudal Fijo	-1	-15.3	Si
Q5	Salida lineamiento Pelotas	Caudal Fijo	-1	-3.65	Si
Q6	Salida lineamiento Tietê	Caudal Fijo	-1	-9.96	Si

Tabla 5: Valores calculados de los parámetros y su información previa. Las unidades son metro y día. En tipo de parámetro: transmisividad (T), permeabilidad isotrópica (K), la permeabilidad en la dirección paralela al lineamiento de Loanda (K1) y en la dirección perpendicular (K2).

CONCLUSIONES

El premodelo numérico de flujo propuesto resulta coherente con la información proporcionada y reproduce cualitativamente las isopiezas calculadas a partir de los datos de campo. Sin embargo, el modelo posee algunas limitaciones que deberán ser tenidas en cuenta a la hora de construir un modelo más robusto.

Es importante remarcar que el éxito de un modelado está condicionado por la calidad, densidad y confiabilidad de los datos con que se dispone. En sentido es de destacar como las limitaciones más importantes, la mayoría descrita en detalle durante el desarrollo de este capítulo, son: puntos de observación (escasa fiabilidad de las medidas y espacialmente mal distribuidos); explotaciones (no se conocen las extracciones en toda la región de estudio); propiedades hidráulicas (valoración); recarga por precipitación (no estudiada en detalle); no incorporar en el estudio los datos químicos del agua; y no se incluyó en la modelación los acuíferos superiores Bauru y Serra Geral.

La construcción de un modelo multicapa con cuatro capas (es decir Acuífero Bauru, Acuífero Serra Geral, Acuífero Guarani y Acuitardo Passa Dois) podrá ser aplicado para la región Centro-Oeste del Estado de Sao Paulo, Brasil, en función de la cartografía hidrogeológica existente hasta el presente.

El mapa hidrogeológico ha sido la herramienta indispensable para la modelación, en él se buscó presentar un esfuerzo de integración e conceptualización de la información hidrogeológica disponible en el área estudiada.

AGRADECIMIENTOS

Merecen un agradecimiento especial por su cooperación las siguientes instituciones: Universidad do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS, Brasil), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC, España), Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA, Argentina), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) y Servei Cartogràfic de Catalunya (España).

BIBLIOGRAFÍA

Araújo, L.M.; França, A.B.; Potter, P.E. 1995. Giant Mercosul aquifer of Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay: hydrogeologic maps of Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones and Tucuaembó Formations. Curitiba, UFPR/PETROBRÁS.

Araújo, L.M.; França, A.B.; Potter, P. 1999. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. *Hydrogeology Journal* 7:317-336

Bugeda, G. 1990. Utilización de técnicas de estimación de error y generación automática de mallas en procesos de optimización estructural. Barcelona, Escuela Técnica

Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Tesis Doctoral.

- Campos, H.C.N.S. 1998a. Applied groundwater modeling in the Botucatu aquifer system, Brazil. In: 8th Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment, Vancouver, Canada. Proceedings...Balkema, Rotterdam, 2359-2366.
- Campos, H.C.N.S. y Cerón-García, J.C. 1998. Algunos aspectos de la hidroquímica del sistema acuífero Botucatu (Cuenca del Paraná, Estado de Sao Paulo, Brasil). *Revista Geológica de España*, 23: 23-25.
- Campos, H.C.N.S. 1999b. Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guarani, escala 1:2.500.000 (inédito). Editado por ISOMAPA – Consultoria e Projetos Ltda. (Sao Paulo, Brasil).
- Custódio, E. y Llamas, M. 1976. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, Barcelona, España.
- Carrera, J. & Neuman, S. 1986. Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions, I, Maximum likelihood method incorporating prior information. *Water Resour. Res.*, 22 (2), 199-210.
- Ferreira, F. J. F. 1982. Alinhamentos estruturais-magnéticos da região Centro-Oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. *Geologia da Bacia do Paraná, Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos*. Sao Paulo, PAULIPETRO, p.143-166.
- Fúlfaro, V.J.; Saad, A.R.; Santos, M.V. dos; Vianna, R.B. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *Geologia da Bacia do Paraná. Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos*. Sao Paulo, PAULIPETRO, 75-115.
- Gilboa, Y.; Mero, F.; Mariano, I.B. 1976. The Botucatu aquifer of South America, Model of an untapped continental aquifer. *Journal of Hydrology*, 29 (1976): 165-179.
- Kimmelman, A.; Foster, M.; Coelho, R. 1996. Environmental isotope and hydrogeochemical investigation of Baurú and Botucatú aquifers, Paraná Basin, Brazil. *Isotope Investigations in Latin America*. IAEA, TECDOC 835, p57-74.
- Medina, A.; Galarza, G.; Carrera, J. 1996. TRANSIN II. Fortran code for solving the coupled flow and transport inverse problem in saturated conditions. In: El Berrocal Project. Characterization and validation of natural radionuclide migration processes under real conditions on the fissured granitic environment. European Commission Contrac nº FI2W/CT91/0080. Topical Report 16. ENRESA.

- Northfleet, A.A.; Medeiros R. A.; Muhlmann, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. Boletim Técnico PETROBRÁS, Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 12 (3): 291-346, jul/set.1969.
- Rebouças, A.C., 1976, Recursos hídricos da Bacia do Paraná. São Paulo, Tese de Livre Docência, IGc/USP, 143p., 2 mapas.
- Rocha, G.A. 1997. O grande manancial do Cone Sul. Estudos Avançados, 30 (11): 191-212 [Publicação da Revista Estudos Avançados, Instituto de Estudos Avançados/USP].
- 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.
- Zalán, P.V.; Wolff, S.; Conceição, J.C.J.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T.; Zanotto, O.A.; Marques, A. 1991. Tectonics and sedimentations of the Paraná Basin. Gondwana Seven Proceedings. Paper presented at the Seventh International Gondwana Symposium. Edited by H. Ulbrich & A.C. Rocha-Campos. Inst. Geoc. USP, Sao Paulo, SP.