

GRUPO ARAPEY: BASALTOS CONFINANTES DEL ACUIFERO GUARANI EN URUGUAY

J. Bossi y A. Schipilov

Recibido: 14 de julio de 1998. Aceptado: 7 de agosto de 1998.

RESUMEN

En función de la creciente demanda de agua potable con fines agropecuarios cobra especial importancia el conocimiento geológico e hidrogeológico de las unidades acuíferas infrabasálticas, conocidas como acuífero Guaraní en el cono Sur. Se discuten las diferentes concepciones estratigráficas manejadas históricamente para las formaciones geológicas del tope del Supergrupo Gondwana en el Uruguay, portadoras de enormes volúmenes de agua subterránea con potencial termal, de uso agrícola (riego) y suministro urbano. Se describen las unidades geológicas que conforman –en distinta medida– el acuífero Guaraní: formaciones Buena Vista, Cuchilla Ombú, Tacuarembó y Rivera.

Las posibilidades económicas de aprovechar el agua subterránea del acuífero Guaraní están directamente condicionadas por la geometría y espesor de su confinante: el Grupo Arapey. Dicho grupo se ha compartimentado –siguiendo criterios litoestructurales– en 6 formaciones, de las cuales se brinda una somera descripción.

Se concluye la geometría tridimensional preliminar de las lavas basálticas del Grupo Arapey y su relación con el acuífero Guaraní, en lo que refiere al espesor de basalto a atravesar para poder extraer agua subterránea con un margen de error de 30 metros, sobre todo en zonas de suelos superficiales y muy superficiales, donde la instalación de sistemas de riego implicaría una mejora agraria sustancial en las áreas consideradas.

PALABRAS CLAVE: Grupo Arapey, Acuífero Guaraní, Geología, Hidrogeología, Uruguay

SUMMARY

THE ARAPEY GROUP: CONFINING BASALTS OF THE GUARANI AQUIFER IN URUGUAY

With the increasing demand of drinking water for agricultural use, takes special importance the geological and hydrogeological knowledge of the infrabasaltic aquifer known as Guaraní Aquifer in the South Cone. The different stratigraphic concepts historically managed for the geological formations of the top of Gondwana Super-group in Uruguay, carrying great volumes of groundwater with thermal potential, agricultural use (irrigation) and urban supply are discussed. Geological units of Guaraní Aquifer are described: Buena Vista, Cuchilla Ombú, Tacuarembó and Rivera formations.

Geometry and thickness of its confining unit –Arapey group– condition the economic possibilities of taking advantages using groundwater from Guaraní Aquifer. Such group has been divided –according to lithostructural criteria– on six formations for which a brief description is given.

A preliminary tridimensional geometry of Arapey group's basaltic lava and its relation with Guaraní Aquifer is showed. This geometry is related to the basaltic thickness to cross in a borehole in order to obtain groundwater with an error margin of about 30 meters. This is very relevant, specially in lithosol zones of the basaltic area, where the installation of irrigation systems would mean a sustancial agrarian improvement in these areas.

KEYWORDS: Arapey Group, Guaraní Acquifer, Geology, Hidrogeology, Uruguay.

INTRODUCCION

Las necesidades de agua potable van creciendo a un ritmo mucho mayor que la población mundial. Si se toman los datos brindados por el Rector de la Universidad de Paraná (Brasil), Prof. Riad SALAMUNI, en el acto de aper-

tura del I Mercosur de Aguas Subterráneas que tuvo lugar en Curitiba en 1995, es posible construir la tabla Nº 1 que demuestra con números la referida tendencia.

La demanda esperada del sector agrario es la más importante para el siglo venidero, asociado al desarrollo tecnológico de los sistemas de riego, que pueden operar con rentabilidad económica en la enorme mayoría de los casos.

El avance de los conocimientos sobre el acuífero más importante de Sudamérica (ARAUJO *et al.*, 1995; GILBOA *et al.*, 1976; REBOUÇAS, 1994) – cuya porción meridional se encuentra en Uruguay, debajo de los derra-

mes basálticos Mesozoicos – abre una perspectiva alentadora para obtener grandes caudales con pozos perforados en zonas donde la acumulación de agua superficial se hace impracticable. Los hallazgos estratigráficos para los sedimentos gondwánicos de Uruguay a cargo de ANDREIS y FERRANDO (1982), FERRANDO y ANDREIS (1986), generaron progresos considerables en la comprensión del funcionamiento del acuífero infrabasáltico.

Tabla 1. Consumo mundial histórico y proyectado de agua según R. SALAMUNI (1995)

Año	Población	Consumo anual en km ³ de agua			
	mundial (10 ⁶)	doméstico	industrial	agrícola	total
1900	1650	140	30	230	400
1975	3650	365	650	1785	2800
2010	7000	650	2600	4500	7750

El desarrollo del Programa Basalto durante 1967 – 1973 financiado por el Plan Agropecuario del entonces Ministerio de Ganadería y Agricultura (BOSSI y HEIDE, 1970), el proyecto ECOS con las Universidades de Lyon y Niza (Francia) entre 1994 y 1998 y el programa Rocas Igneas Básicas del Uruguay financiado por CSIC entre 1995 y 1997, permitieron desarrollar técnicas fotogeológicas originales y criterios de campo, que hacen posible determinar por cartografía geológica el espesor de las rocas basálticas en cada lugar del país, con un error del orden de ± 30 m.

La consideración conjunta de las modificaciones estratigráficas y nuevas técnicas permitió concluir que era necesario y conveniente dar a conocer los avances logrados por las implicancias que podrían tener en la reconversión agraria del área basáltica, material madre de suelos en 41.000 km² y especialmente en la zona de suelos superficiales y muy superficiales.

El conocimiento del espesor de las rocas basálticas con un margen de error predeterminado va a resultar un dato fundamental para la planificación técnica y económica del aprovechamiento de los enormes caudales que es capaz de brindar el acuífero infrayacente. Ese dato permitirá evaluar el costo de perforación, la posibilidad o no de surgencia y el costo de operación, con sencillos trabajos de relevamiento geológico. La contribución que se plantea se vincula fundamentalmente a la geometría regional del techo basáltico confinante del mayor acuífero de Sudamérica. Apunta específicamente al conocimiento detallado de las isópacas de los derrames basálticos en el extremo Sur del enorme acuífero.

Reuniendo los datos sobre parámetros hidráulicos del acuífero, su estructura interna con estratigrafía bien conocida y la geometría del confinante superior, es posible intentar aquí un proceso de síntesis escalonada, que en ciencias naturales representa un objetivo fundamental (ROUTHIER, 1958).

MATERIALES Y METODOS

Los datos que sustentan esta propuesta fueron obtenidos en labores de relevamiento de campo en áreas seleccionadas como claves en la fotointerpretación. Se utilizaron fotografías aéreas 1:40.000 del Servicio Geográfico Militar (misión 1965-1966) para la determinación de los límites de coladas así como de las estructuras de meso y macro escala. La actual disponibilidad de la colección completa de cartas topográficas de excelente calidad con curvas de nivel cada 10 m permitió acotar con precisión los límites fotointerpretados y calcular los buzamientos regionales.

La geometría de cada una de las coladas puede determinarse en nuestro país ya que existe una íntima asociación entre las texturas fotogeológicas y cada derrame particular; esta situación es única para el Uruguay y no se repite en las demás áreas de afloramiento en la cuenca del Paraná (Brasil y Paraguay) donde la vegetación impide la identificación de estas unidades.

EL ACUIFERO GUARANI

En el presente ensayo será definido según el criterio de ARAUJO *et al.* (1995) que lo consideran constituido por rocas sedimentarias de edad Triásico - Jurásico confinadas hacia el techo por los derrames basálticos de plateau del límite Jurásico – Cretácico, y apoyadas sobre rocas Pérmicas de baja permeabilidad. Cubre un área total de casi 1.200.000 km² con la siguiente distribución territorial: 839.000 km² en Brasil, 225.000 km² en Argentina, 72.000 km² en Paraguay y 59.000 km² en Uruguay (figura 1).



Figura 1. Distribución del acuífero Guaraní (grisado) en el cono Sur.

Este acuífero tiene gran significación como fuente hídrica de alta calidad para riego, estaciones termales, uso industrial y hasta para suministro de agua potable a centros poblados. Aunque el acceso al acuífero es costoso por la necesidad de atravesar espesores importantes de rocas basálticas, los caudales son normalmente enormes, con valores del orden de 100 m³/hora. GODOY y PAREDES (1995) comunican valores de hasta 500 m³/hora en zonas de acuífero confinado captado a profundidades del orden de los 700 metros y espesores de hasta 800 metros.

Espesores tan importantes de rocas sedimentarias tienen variaciones regionales asociadas a diferencias de ambientes de depositación, que generan cambios en la porosidad, permeabilidad y transmisividad de las rocas, las cuales inciden en modificaciones de la capacidad de almacenaje y desplazamiento del agua subterránea. ARAUJO *et al.* (1995) señalan que los estratos Jurásicos de origen eólico (Formaciones Botucatú en Brasil, Solari en Argentina, Misiones en Paraguay, Rivera y Cuchilla Ombú en Uruguay) son excelentes acuíferos en toda la cuenca. En cambio, los sedimentos Triásicos, de origen fluvio-lacustre (formaciones Piramba, Sanga do Cabral y Santa María en Brasil, Independencia en Paraguay y Tacuarembó y Buena Vista en Uruguay) son localmente demasiado arcillosos y pierden el carácter de acuífero.

Las zonas de recarga de este enorme acuífero se ubican en la periferia del área de afloramiento de las rocas basálticas suprayacentes y confinantes: Fm. Serra Geral en Brasil, Fm. Alto Paraná en Paraguay y Grupo Arapey en Uruguay. Las cotas de la superficie potenciométrica, que une las alturas hasta las cuales los sedimentos están saturados en agua (niveles estáticos) en relación al nivel del mar, son muy altos en Brasil y disminuyen hacia el Sur y el Oeste (RAMOS *et al.*, 1990). Se configura así una cuenca madura desde el punto de vista hidrodinámico, con predominio de los regímenes de flujo centrípeto. Toda esta estructuración regional se produce durante el Cretácico, período en el cual se inyecta también el haz de diques basálticos de Punta Grossa (Paraná, Brasil) que divide el acuífero Guaraní en dos regímenes hidrológicos: uno al Norte y otro al Sur del haz de diques.

El régimen hidrológico al Norte del arco de Punta Grossa tiene cotas potenciométricas superiores a 600 metros con flujo regional SW, gradientes de 3 m/km junto a zonas de recarga, cayendo a 0,2 m/km a distancias de pocas decenas de kilómetros desde los afloramientos. El segundo compartimento hidrológico, al Sur del haz de diques, se distingue del anterior por los altos gradientes hidráulicos y las importantes áreas de descarga. La cota potenciométrica en el Este es de 1200 m y en el Oeste alcanza sólo 50 m. La dirección regional del flujo es SW (ARAUJO *et al.*, 1995). Junto a la zona de recarga el gradiente hidráulico es de 5 m/km cayendo a 2 m/km en el Sur de Brasil, Uruguay y Mesopotamia Argentina, para llegar a valores de 0,3 m/km en las provincias de Entre Ríos y Santa Fe (Argentina). Según los autores referidos, esta zona representa el área

principal de descarga del acuífero.

LOPES (1984) realizó estudios hidrogeológicos dentro del acuífero en el estado de Sao Paulo (Brasil) midiendo permeabilidades de 0,2 a 4 m/día y transmisividades de 40 a 500 m²/día en las áreas aflorantes. En áreas confinadas por basaltos, ambos valores aumentan: permeabilidades de 3 ± 1 m/día y transmisividades de 1000 ± 200 m²/día. Estos parámetros presentan gran variación según el tipo litológico predominante en la sección estudiada. Como se verá más adelante, para el análisis del acuífero Guaraní en Uruguay, el espesor total de sedimentos involucrados incluye litologías de naturaleza tan diferente que inciden en un comportamiento hidrogeológico muy heterogéneo.

EL ACUIFERO GUARANI EN URUGUAY

Si se mantiene el criterio adoptado para toda la cuenca de Paraná, este acuífero está constituido en Uruguay por la formación Buena Vista *sensu* ANDREIS y FERRANDO (1982) en la base y el grupo Batoví Dorado descrito por FERRANDO y MONTAÑA (1986) en la cima. Estas unidades sedimentarias constituyen el tope del Supergrupo Gondwana. Se apoyan sobre pelitas y areniscas finas arcillosas poco o nada permeables y están cubiertas por las lavas basálticas del grupo Arapey que determinan el confinante del acuífero. Son conocidas con suficiente detalle en la región Noreste del Uruguay, con abundantes trabajos publicados, pero fueron mucho menos estudiados en el Noroeste, debajo de las capas basálticas. Es precisamente por la falta de afloramientos, la relativa escasez de pozos profundos y perforados a percusión, que se dispone de datos fragmentarios y reducidos.

Este concepto de acuífero Guaraní es diferente del hasta ahora denominado acuífero Tacuarembó en Uruguay, y es imprescindible dedicar algunas frases para explicar esa diferencia, porque el tema es de gran importancia por el reservorio de agua que encierra.

Desde FALCONER (1937) hasta SPRECHMANN *et al.* (1981) se denominó formación Tacuarembó a la unidad sedimentaria del Neo-Gondwana que contenía las únicas areniscas eólicas acumuladas en dunas desérticas fósiles conocidas. Aunque en el detalle, los distintos autores variaban la secuencia intraformacional, se reconocía un episodio eólico en la cima y uno subacuático con peces fósiles en la base. Esta unidad se denomina formación Botucatú en Brasil y acuífero Botucatú al reservorio hidrogeológico contenido en ella. Por correlación, se denominó acuífero Tacuarembó al reservorio infrabasáltico uruguayo.

ANDREIS y FERRANDO (1982) descubren la existencia de otro episodio eólico de hasta 50 metros de espesor en la base de lo que desde BOSSI *et al.* (1975) se denominaba Fm. Tacuarembó. Dichos autores reconocen luego la posibilidad de separar una nueva formación por la extensión suficiente como para ser cartografiada y proponen denominarla Cuchilla Ombú (FERRANDO y ANDREIS, 1986).

GRUPOS	FORMACIONES	ESPESORES	EDAD
Arapey			CRETACICO
Batoví Dorado	Rivera	30-50	JURASICO
	Tacuarembó	100-300	
	Cuchilla Ombú	30-50	TRIASICO
Caraguatá	Buena Vista	50-80	
	Yaguarí		PERMICO
	Melo		

Acuífero
Guaraní
en
Uruguay

Figura 2. Cuadro de síntesis de las unidades formacionales del tope del Superggrupo Gondwana.

BOSSI y NAVARRO (1991) crean el grupo Batoví Dorado integrado por 3 unidades estratigráficas cartografiables: Fm. Cuchilla Ombú en la base; formación Tacuarembó en la parte media y Fm. Rivera en la cima.

En los mismos años se reconoce que dentro de la Fm. Yaguarí de edad Permo - Triásica, es separable el miembro superior como una unidad independiente y cartografiable. FERRANDO (1984) propone volver a separar la Fm. Buena Vista, compuesta por areniscas medias, gruesas y conglomerádicas como litofacies dominantes. La base, en contacto con el resto de la ex - formación Yaguarí, coincide exactamente con el límite entre los períodos Pérmico y Triásico en función del hallazgo de restos fósiles bien característicos (BARBERENA *et al.*, 1985). En la figura N° 2 se presenta un cuadro ilustrativo del estado actual de los conocimientos y su correlación, como ensayo de síntesis escalonada relacionando diversos aspectos aislados.

La primera información sobre la estructura de los sedimentos infrabasálticos se debió simultáneamente a MAC KINON (1967) y HAUSMAN y FERNANDEZ (1967) quienes describieron algunos cortes geológicos a partir del estudio de 5 sondeos profundos realizados por ANCAP y el Instituto Geológico. PADULA (1972) utiliza datos de los pozos de Uruguay y agrega la información del sondeo profundo de Nogoyá (Entre Ríos, Argentina) para construir perfiles con mayor volumen de datos. BOSSI y NAVARRO (1991) apoyados en una carta geológica de toda el área basáltica (BOSSI *et al.*, 1974) y abundante información gravimétrica y geoelectrónica, elaboran el primer documento con la distribución tentativa del grupo Batoví Dorado en su área de afloramiento y en la zona confinada debajo del área basáltica, tanto en planta como en un corte geológico (Figura 3).

Un hecho significativo es que las diversas unidades sedimentarias infrabasálticas aumentan su espesor hacia el Oeste y cambian su composición litológica como consecuencia de una mayor tasa de subsidencia. Los perfiles secuenciales de los alrededores de la ciudad de Tacuarembó (SPRECHMANN *et al.*, 1981) sufren importantes modificaciones hacia el Oeste.

La información que sigue fue obtenida por J. BOSSI y R. NAVARRO para la empresa Paycueros y es posible publicar-



Figura 3.- Distribución tentativa del Grupo Batoví Dorado en su zona de afloramiento y subsuperficialmente sensu BOSSI & NAVARRO (1991).

la gracias a la autorización expresa de su presidente, el Ing. Agr. Conrado Olaso Igoa. Aunque se refiere en especial a la región de aguas termales surgentes, pareció de interés su comunicación porque permite una visión global del comportamiento del acuífero Guaraní en Uruguay (figura 4).

La perforación de Quebracho, en las actuales termas de Guaviyú, puede tomarse como modelo del comportamiento del acuífero Guaraní en el Oeste de Uruguay. La boca del pozo se encuentra a cota +33m y el perfil geológico es el que se describe a continuación según datos de MAC-KINNON (1967), HAUSMAN y FERNANDEZ (1967) y PADULA (1972), reinterpretados:

0m - 102m areniscas Cretácicas de la Fm. Guichón

102m - 677m lavas basálticas en 11 derrames superpuestos

677m - 840m areniscas rojizas de grano fino a medio ($M_d = 0,2mm$), bien seleccionadas con escaso cemento arcilloso. Niveles pelíticos cada 20 a 25 metros que representan el 15% del total. Se ha calculado una permeabilidad de 2 m/día aplicando el criterio de TODD (1973).

840m - 960m areniscas limosas con escasos niveles de areniscas finas. Esta unidad pertenece a la Fm. Yaguarí donde dominan las rocas muy finas, con $M_d = 0,08mm$. El coeficiente de permeabilidad es muy bajo, del orden de 17 cm/día.

960m - 1103m rocas glaciares y fluvio - glaciares del grupo San Gregorio - Tres Islas.

1103m - 1112m rocas graníticas del zócalo precámbrico.

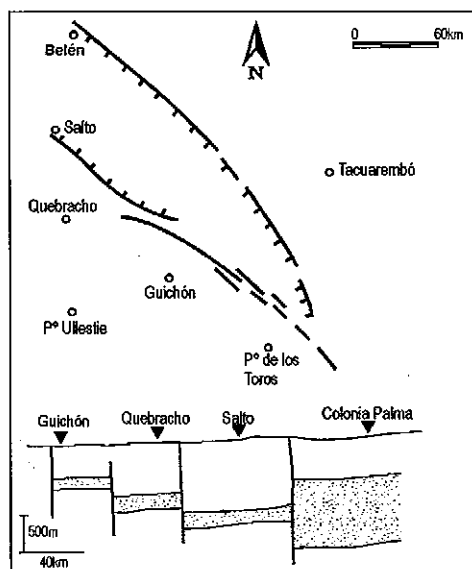


Figura 4. Ubicación de las perforaciones estudiadas por J. BOSSI & R. NAVARRO (com. per.), y estructura geológica esquemática del área basáltica en NW del Uruguay.

En este sondeo, los niveles de contribución se encuentran a 500 - 540m y 750 - 900m de profundidad (BUQUET, 1943). El acuífero superior está en las rocas basálticas y el inferior abarca el grupo Batoví Dorado y la Fm. Buena Vista. Los valores de permeabilidad calculados con el criterio propuesto por TODD (1973) fueron confirmados por medidas de caudales y espesores del nivel de contribución aplicando la ley de DARCY. Se procedió así para los 5 sondeos profundos que se exponen en la tabla 2.

Tabla 2. Espesores promedios de las coladas basálticas del grupo Arapey.

Perforación	Espesor (m)	Nº derrames	Espesor medio (m)
Colonia Palma (Artigas)	518	11	47
Belén (Salto)	160	4	40
Termas Daymán (Paysandú)	946	26	36
Termas Guaviyú (Paysandú)	575	11	52
Paso Ullestie (Paysandú)	361	10	36
Guichón (Paysandú)	506	11	46
Salsipueses (Tacuarembó)	210	8	26
Paso de los Toros (Tacuarembó)	159	8	20
Pelado (Artigas)	160	4	40
Catalán Grande (Artigas)	164	4	41
Catalancito (Artigas)	157	4	39

Los sedimentos infrabasálticos suministran en todos los sondeos alejados del borde Sur del acuífero Guaraní en Uruguay, caudales de 200 a 400 m³/hora y poseen coeficientes de permeabilidad entre 2 y 3 m/día. En la tabla 3 se indican las litologías y el espesor del acuífero así como el caudal y coeficiente de permeabilidad.

Tabla 3. Características litológicas e hidrogeológicas del acuífero Guaraní en los sondeos estudiados.

Sondeo	Espesor (m)	Areniscas (%)	Limos (%)	Arcillas (%)	Caudal (m ³ /día)	Perm. (m/día)
Arapey	272	83	—	17	800	3.2
Daymán	193	88	6	6	200	1.7
Quebracho	163	85	5	10	400	2
Guichón	128	76	—	24	42	0.5
P. Ullestie	89	27	41	32	6	0.05

Los niveles piezométricos alcanzados en las diferentes perforaciones han sido directamente obtenidos por J. BOSSI y R. NAVARRO en 1981 (com. pers.) (figura 4). Como lo prueban los caudales y profundidades tan diferentes dentro

del acuífero, las grandes fallas regionales generan compartimentos aislados con direcciones de flujo y gradientes hidráulicos diferentes.

GONZALEZ y DE SANTA ANA (1998) realizan un análisis faciológico basados en datos de sondeos de la sedimentación continental Eo- Mesozoica en el NW de la cuenca gondwánica (extremo meridional de la cuenca del Chaco – Paraná), definiendo dos unidades depositacionales en condiciones áridas. La información que brindan, aunque resumida, representa un primer aporte significativo para los sedimentos infrabasálticos del acuífero Guaraní. Los sedimentos Triásico- Jurásicos, en espesores de hasta 1200m, son referidos con predominio de litofacies arenosas. Las pelitas se desarrollan esporádicamente y en niveles poco espesos, sugiriendo –para los autores– condiciones de aridez.

La unidad basal se apoya sobre sedimentos pérmicos y está integrada por paquetes arenosos de 20 a 40m de espesor individual con delgados niveles pelíticos intercalados cuyo espesor no se indica. Las areniscas son finas a medias, bien seleccionadas, cuarzosas, rojizas, bien redondeadas y con cemento calcáreo. En testigos esporádicamente extraídos hay planos de estratificación con buzamientos de hasta 30° respecto al plano horizontal.

La unidad superior está integrada por arenas finas a muy finas, de colores rosados a rojizos, regular a mal seleccionadas, de redondeamiento variable. Los niveles pelíticos se intercalan con mayor frecuencia. El espesor total varía entre 300 y 650m. Esta unidad depositacional se debe vincular a un ambiente fluvio- lacustre en la base con evolución a un sistema fluvio- eólico. Aunque los autores no lo citan, están reconociendo en la unidad basal las formaciones Buena Vista y Cuchilla Ombú mientras que en la unidad superior, las Fms. Tacuarembó y Rivera.

En el esquema actualmente aceptado, los niveles acuíferos tienen espesores entre 30 y 80 m, separados por la Fm. Tacuarembó (con hasta 300 metros de potencia) que por su naturaleza petrográfica puede llegar a un comportamiento como acuitardo en gran parte del área considerada.

La litología dominante de la Fm. Rivera son areniscas medias ($Md = 0,2$ mm), bien seleccionadas, feldespáticas (5 a 10%), con escaso cemento caolínítico. Presentan estratificación cruzada de trecho largo con buzamientos de hasta 35°. Se ha formado por fosilización de dunas (SPRECHMANN *et al.*, 1981). La granulometría es nítidamente unimodal en la clase 0,25 – 0,12mm (BOSSI, 1966). Estas rocas son muy porosas y permeables.

En la formación Tacuarembó la litología dominante son areniscas finas a muy finas, bien seleccionadas, poco redondeadas, feldespáticas y micáceas con abundante cemento arcilloso (FERRANDO y ANDREIS, 1986). Estas litologías se interestratifican con limolitas y lutitas muscovíticas con espesores de hasta 1 metro y longitudes de hasta 20 metros. Esta unidad estratigráfica, de acuerdo a sus rocas constituyentes, tendría como propiedades hidráulicas bajos valores de porosidad, permeabilidad y transmisividad.

La Fm. Cuchilla Ombú fue definida por FERRANDO y ANDREIS (1986) como una unidad litoestratigráfica de origen eólico, con potencia no superior a 50 metros en áreas aflorantes, integrada por areniscas finas a medias con predominio de estructuras entrecruzadas de tipo cuneiforme planar. Los granos son redondeados y el cemento escaso. Son consideradas dunas fósiles de tipo barján por la orientación unipolar de las paleocorrientes hacia el SE y la ausencia de indicios de vegetación. Esta unidad constituye uno de los mejores niveles del acuífero Guaraní, con una porosidad de 20% y permeabilidades de hasta 4,6 m/día si se toman datos de LOPES (1984) para unidades equivalentes en el estado de Sao Paulo.

La Fm. Buena Vista fue creada por FALCONER (1937), eliminada por BOSSI (1966) y reformulada por FERRANDO (1984). En la definición original estaba integrada por areniscas rojas de grano grueso con frecuente laminación entrecruzada, que en superficie se desarrollan principalmente el NW de la ciudad de Melo. En el sondeo de Colonia Palma en el Dpto. de Artigas ha sido atravesada entre 1530 y 1660 metros de profundidad según las descripciones de BOSSI y NAVARRO (1991) pero los datos disponibles son muy imprecisos. Las condiciones de sedimentación fluvial – lacustre han determinado variaciones de facies muy importantes que generan comportamientos hidráulicos diferentes según las áreas. No existen esos datos para Uruguay y se dispone solamente de los valores calculados para todo el acuífero por ARAUJO *et al.* (1995): porosidad 10 ± 4 % y permeabilidad $1 \pm 0,5$ m/día.

El principal nivel aporte de agua subterránea proviene de la Fm. Cuchilla Ombú ya que posee mayor superficie aflorante y además es alimentada por percolación vertical del acuitardo de la formación Tacuarembó. Tiene gran capacidad de almacenaje y una permeabilidad que puede alcanzar valores de 4,6 m/día. La formación Rivera presenta las mismas características de potencia, textura y estructura, y por lo tanto las propiedades hidráulicas, pero tiene dificultad de recarga por aflorar en zonas de topografía muy quebrada.

EL CONFINANTE BASALTICO: METODO DE ESTUDIO

La posibilidad de aprovechamiento del acuífero Guaraní en las áreas de grandes caudales se asocia a perforar las capas basálticas sobrepuestas. Resulta entonces de máximo interés conocer en cada zona el espesor de basalto a atravesar y los caudales a esperar. Los caudales, en general, son muy importantes y no constituyen un factor limitante para la mayoría de los objetivos de utilización, incluyendo el riego.

Los datos puntuales de las perforaciones y de los sondeos eléctricos verticales no permiten establecer planos de contacto aceptablemente precisos para la determinación del

espesor de los derrames basáltico del grupo Arapey, lo que representa una limitación importante para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proyecto de pozo que siempre implica una inversión considerable.

BOSSI y HEIDE (1970) descubrieron la posibilidad foto-geológica de definir a escala 1/40.000 los contactos de cada derrame, por la diferencia de comportamiento entre los niveles vesiculares y masivos. Este descubrimiento dio posibilidades de establecer la secuencia estratigráfica rigurosa en cualquier punto del área aflorante, derrame por derrame, cuando la topografía es moderadamente quebrada.

El espesor de cada derrame es variable y crece de Este a Oeste, con valores de 35 ± 5 metros en el borde oriental y de 42 ± 5 metros en los pozos profundos de la región occidental (ver figura 4). También son variables las formas de los contactos, incluyendo o no delgados niveles de areniscas, pero en términos generales puede estimarse que el espesor medio de los derrames individuales se ubica alrededor de los 40 metros.

En 1994 se firma un convenio ECOS de cooperación entre las Universidades de Lyon y Niza (Francia) y de la República (Uruguay) para renovar los estudios del área basáltica del noroeste de Uruguay, por la importancia que desde varios puntos de vista encierra el exhaustivo conocimiento científico de un enorme fenómeno magmático que puede estudiarse derrame por derrame. Este nuevo enfoque del problema dispuso de fotos aéreas a escala 1/20.000 y 1/40.000, cartas topográficas a escala 1/50.000 y los valores de anomalías gravimétricas Bouguer de toda el área, en documentos públicos de muy buena calidad del Servicio Geográfico Militar. Al disponerse de documentos de base tan precisos se hizo posible reunir numerosa información cuantitativa de cada derrame.

GRUPO ARAPEY

La aplicación sistemática del método en toda el área basáltica permitió reconocer la existencia de 6 bloques de comportamiento netamente diferente, tomando en cuenta varios parámetros fundamentales: tipo de roca, ángulo y dirección de la inclinación, presencia o no de areniscas intertrappeanas, desarrollo de grandes fallas, mayor o menor espesor total de basalto.

Esta nueva compartimentación lito-estructural sugirió la conveniencia de proponer la creación de un grupo para poder asignar jerarquía de Formación a cada uno de los 6 bloques arriba referidos. Con este enfoque se procura destacar las diferencias de estructura, naturaleza litológica y morfología superficial de cada unidad integrante. Por otro lado, cada unidad es perfectamente cartografiable, incluso a escalas muy pequeñas (v.g. 1/2.000.000).

La propuesta de crear el grupo Arapey integrado por 6 formaciones denominadas Los Catalanes, Curtina, Piedra Sola, Paso de los Toros, Itapebí y Tomás Gomensoro, se expone gráficamente en la figura 5 donde se agregan las principales perforaciones, con el espesor de basalto y el número de coladas atravesadas.

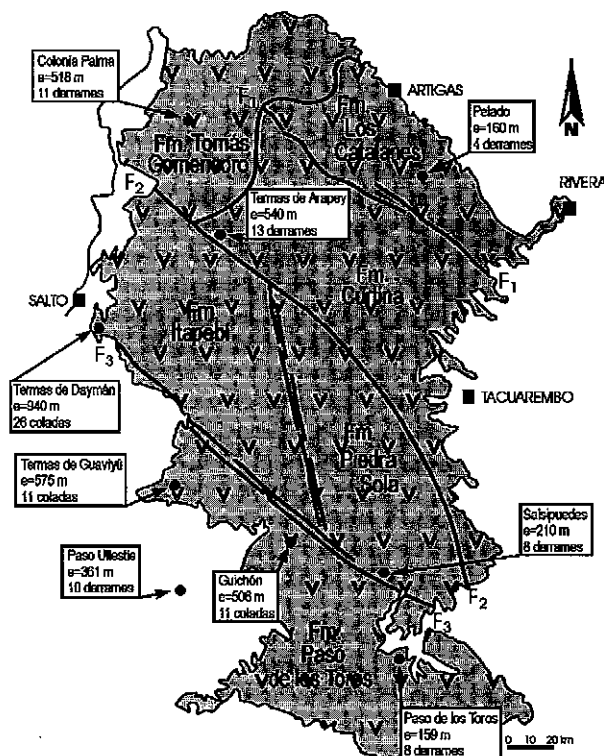


Figura 5. Compartimentación litoestructural del Grupo Arapey, señalando perforaciones, espesor de basalto y número de coladas atravesadas.

La separación de formaciones entre sí se basa fundamentalmente en la existencia de 3 grandes fallas de rumbo NW, indicadas en la figura 5 como F1-F3, F2-F2 y F3-F3 de Norte a Sur, respectivamente. Otra falla importante tiene rumbo N10W y separa las formaciones Itapebí y Piedra Sola. Las relaciones de contacto de la Fm. Tomás Gomensoro parecen ser en cambio de simple superposición estratigráfica, por lo menos de las coladas superiores.

Las características más notorias de cada una de las formaciones propuestas dentro del grupo Arapey son descritas someramente a continuación para recalcar la heterogeneidad de comportamiento actual del enorme magmatismo de plateau mesozoico en el NW de Uruguay.

Formación Los Catalanes: En esta unidad BOSSI y CAGGIANO (1974) reconocieron la existencia de 6 derrames superpuestos estudiando la estructura geológica del Dpto. de Artigas. Determinaron buzamientos máximos de 0,3% y espesores totales desde 10-20 metros en contacto con las areniscas infrayacentes hasta 170m en el sondeo en el predio del Sr. O. Brum en Catalán Grande. En la figura 6 se expone la distribución superficial de estos derrames entre Masoller y Javier de Viana para dar cuenta de la estructura actualmente aceptada. Los basaltos contienen entre 56 y 56% de sílice en peso (en rigor, andesitas) y contienen niveles geódicos rellenos de ágata y amatista.

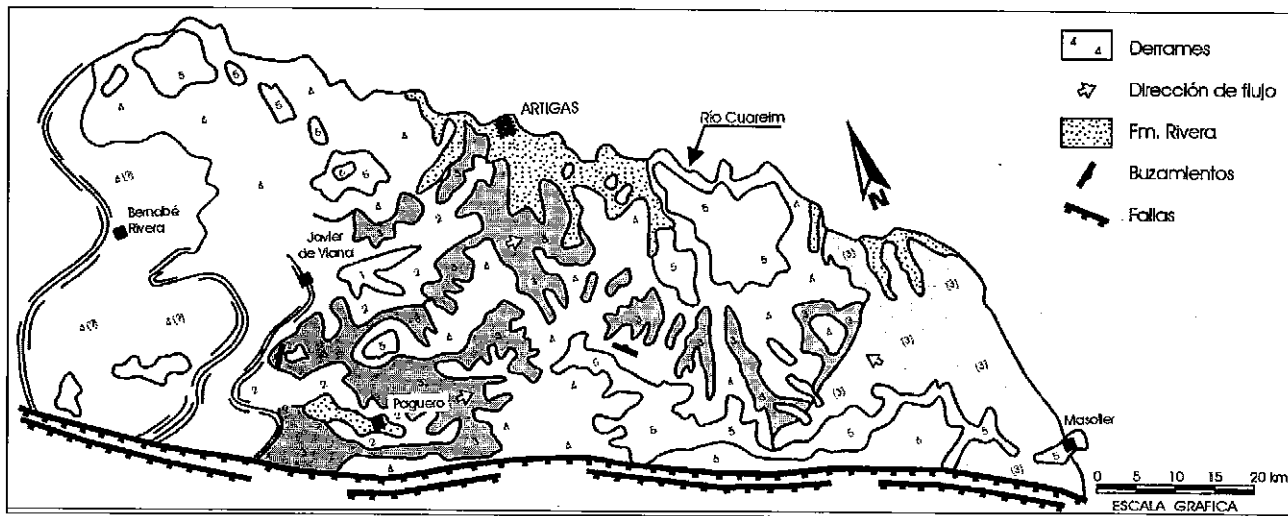


Figura 6. Carta geológica de la Formación "Los Catalanes".

Formación Curtina: Se define como una sucesión de derrames de grano fino a muy fino, con geodas rellenas de material silíceo, frecuentes niveles de areniscas intertrappeanas y una estructura regional buzando 0,5% hacia el NW. Se han reconocido 13 coladas superpuestas cuya distribución regional se expresa gráficamente en la figura 7, extraída de BOSSI y HEIDE (1970). Desde el punto de vista petrográfico dominan las rocas afíricas, de tamaño de grano entre 0,03 y 0,1mm con

textura intersertal, menos de 10% de vidrio, con minerales opacos subautomorfos y escasa presencia de olivina. El tamaño de grano fino y el buzamiento regional de estructura genera paisajes con zonas planas débilmente inclinadas y fuertes pendientes cóncavas entre ellas, respondiendo a la existencia de niveles vesiculares poco resistentes a la meteorización sobre los que se apoyan niveles de basaltos masivos de grano fino que resisten la acción de los agentes atmosféricos.

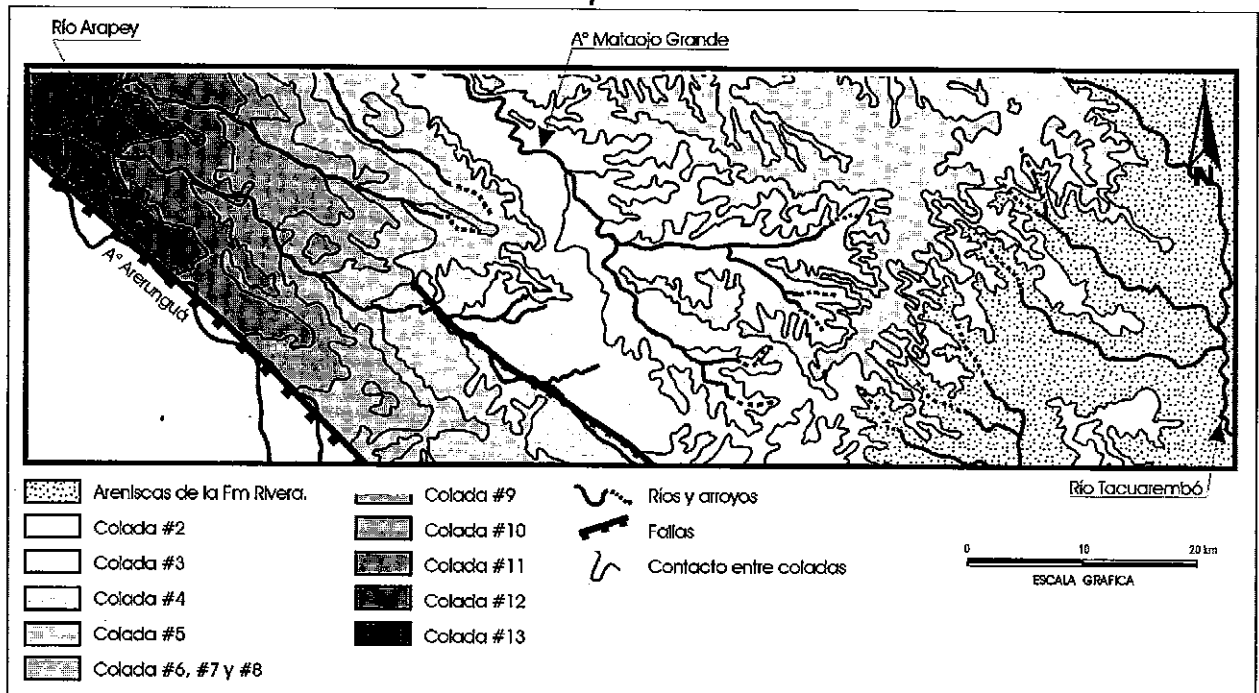


Figura 7. Carta geológica de la Formación "Curtina".

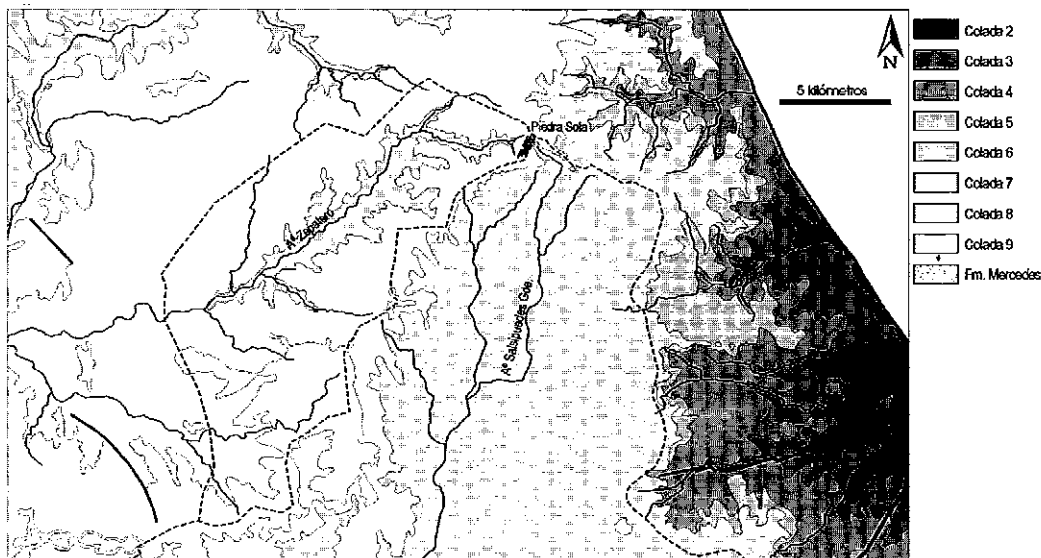


Figura 8. Carta geológica parcial de la Formación "Piedra Sola".

Formación Piedra Sola: Está integrada por 9 derrames superpuestos hasta el borde de los sedimentos Cretácicos que la cubren. La estructura regional muestra un buzamiento de 0.4% hacia el WSW como se puede inferir de la figura 8 donde se expone una porción importante de área de afloramiento. Desde el punto de vista petrográfico, la mayoría de las coladas son micro-porfíricas con tamaño de grano muy fino (0,008 – 0,15mm), textura intergranular, alrededor de 10% de vidrio, fenocristales automorfos a subautomorfos, minerales opacos puntuales tardíos, micro-fenocristales de plagioclasa y/o piroxeno con matriz en la que la

cantidad de piroxeno es igual a la de plagioclasa.

Formación Paso de los Toros: Esta unidad litoestratigráfica reúne 11 derrames basálticos superpuestos de poco espesor individual (promedio 20 metros), buzamientos de 0,7% hacia el SW y texturas de grano grueso o porfírica netamente dominantes. Todos estos factores determinan una morfología superficial apenas suavemente ondulada, con escasos afloramientos. Estos derrames fueron descritos petrográficamente por FERNANDEZ y LEDESMA (1974) y GANCIO y APPRATTO (1993). La relación entre los 7 derrames de la base se muestra en la figura 9.

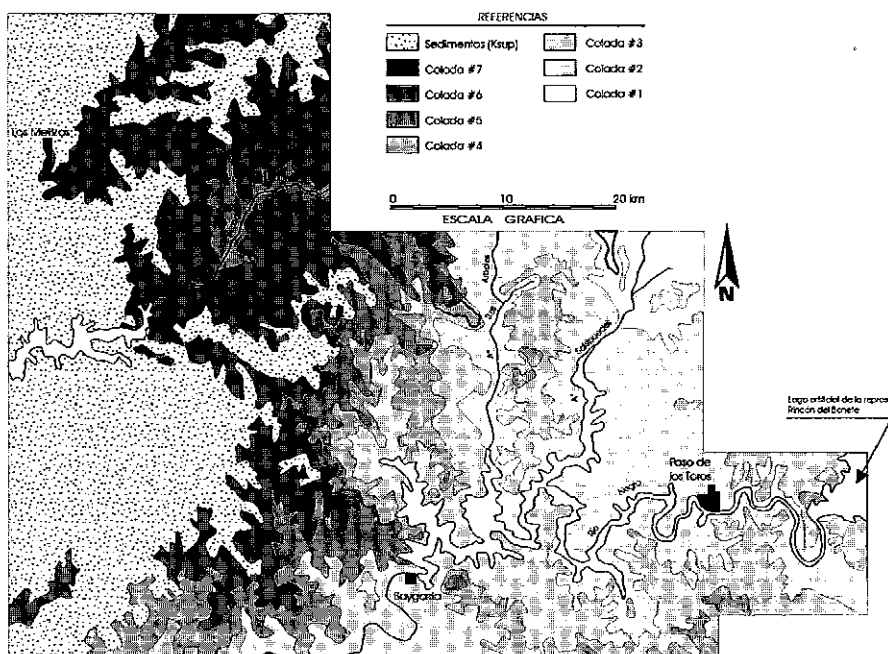


Figura 9. Carta geológica de la Formación "Paso de los Toros".



Figura 10. Carta geológica de la Formación "Itapebí".

Formación Itapebí: Esta unidad presenta varias propiedades notorias. Es un bloque casi horizontal en el que aflora prácticamente una sola colada en 4800 km² (BOSSI et al, 1969). En segundo lugar es el único bloque que contiene 27 derrames superpuestos, generando anomalías gravimétricas fuertemente positivas. La topografía resultante es muy plana y las zonas elevadas están constituidas por basalto vesicular resistente, mientras los basaltos masivos – de grano medio a grueso – presentan facilidad de meteorización. En la figura 10 se reproduce (simplificada) la carta geológica extraída de BOSSI et al. (1969) y BOSSI y HEIDE (1970). Los basaltos masivos de la colada #26 poseen textura intersertal sin fenocristales. Las plagioclasas tienen entre 0,2 y 0,3mm de longitud y los piroxenos 0,1mm de diámetro; labrador y augita aparecen en proporciones equivalentes; la magnetita titanífera es el único accesorio. El porcentaje de vidrio es muy pequeño. La iddingsita es un accesorio esporádico.

Formación Tomás Gomensoro: Esta unidad litoestratigráfica fue separada por una geomorfología muy particular, con grandes extensiones planas, suelos profundos y subsuelo basáltico de grano excepcionalmente grueso. Ocupa 6600 km² en el extremo NW del Uruguay. Es la única formación cuyos bordes no son rectilíneos ni definidos por fallas, sino por frentes de derrames, con límites curvos (ver figura 5). Petrográficamente es un basalto plagioclaso – porfírico de cristales labrador – bytownita (An70) con minerales opacos de gran tamaño (0,5mm de arista). Las plagioclasas de la matriz tienen 0,4 – 0,5mm de longitud y presentan composición de andesina (An45) y dominan sobre los piroxenos en la composición modal. La textura es intersticial con zonas donde el vidrio alcanza valores de 20% en volumen.

GEOMETRIA DEL CONFINANTE BASALTICO

La aplicación del método fotogeológico y cartográfico para determinar el número de coladas superpuestas en cada

zona, el espesor individual de cada una de ellas y el buzamiento regional, permitió establecer la forma geométrica tridimensional de los basaltos del grupo Arapey.

La precisión es relativamente elevada en la región oriental donde el número de coladas superpuestas es reducida y el método no puede aplicarse en caso de estructuras absolutamente horizontales como es la Fm. Itapebí cuyo espesor se puede inferir solamente de los datos del pozo perforado en las termas del Paso de Las Piedras del río Daymán.

En términos generales, el espesor de las rocas basálticas en su conjunto aumenta de Este a Oeste según planos inclinados y/o escalones de fallas. Estas fallas presentan rechazos muy significativos, alcanzando varios cientos de metros a ambos lados Noreste y Suroeste de la Fm. Itapebí.

En un corte esquemático de rumbo prácticamente Norte – Sur, desde la ciudad de Mercedes en el Dpto. de Soriano a la localidad de Colonia Palma en el Dpto. de Artigas, utilizando los datos de las perforaciones de Paso Ulleste, Quebracho, Salto (Paso de las Piedras del río Daymán) y Colonia Palma, es posible ilustrar el comportamiento en bloques de distintos espesores del Grupo Arapey, como se expone en la figura 11a. En otro corte geológico, perpendicular al anterior – rumbo aproximado Este – Oeste – (figura 11b) en el paralelo de la ciudad de Tacuarembó, es posible ilustrar el comportamiento del confinante basáltico aumentando su espesor total hacia el Oeste.

Reuniendo la totalidad de la información disponible que fue descrita en este ensayo: perforaciones, cartas geológicas a escala 1/100.000 de la casi totalidad del área y perfiles topográficos de detalle en cartas a escala 1/50.000, se hizo posible presentar aquí un primer documento en el que se muestran gráficamente las curvas de igual espesor de basalto (isópacas) del grupo Arapey.

Estas curvas son las que se trazaron para cada bloque en función del número de derrames superpuestos, del buzamiento regional y del espesor medido para cada colada en las zonas más próximas a que se tuvo acceso, presentando por lo tanto un error de ± 30 metros en su evaluación (figura 12).

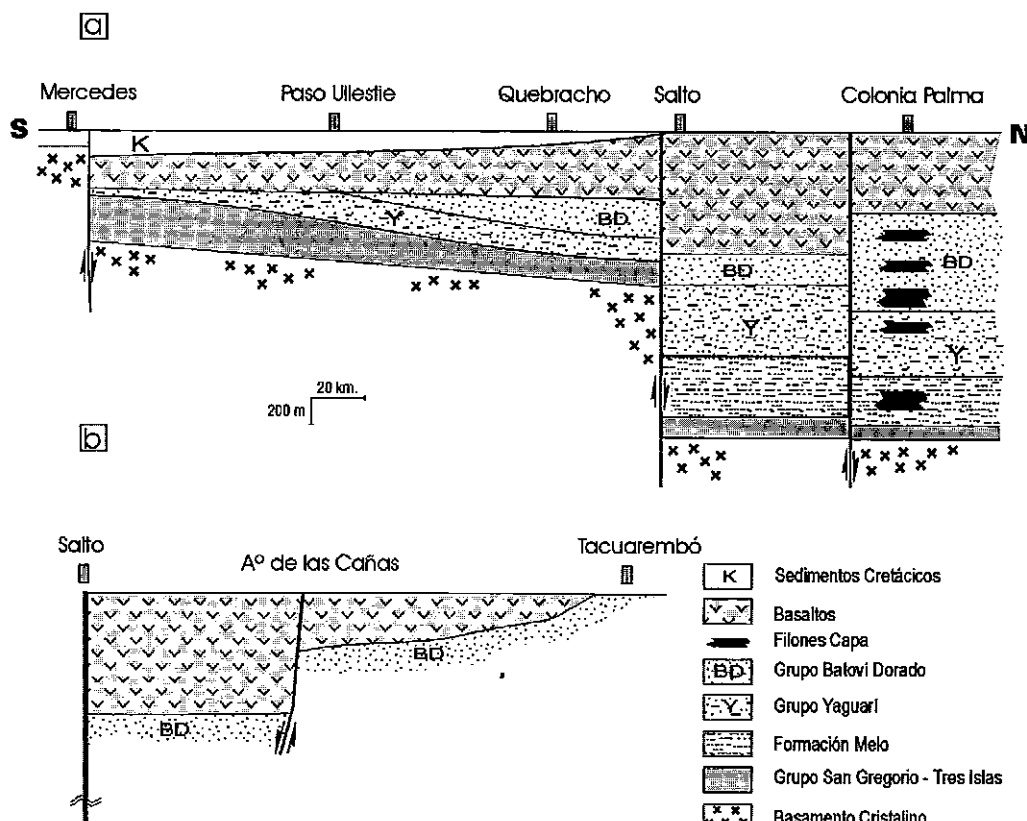


Figura 11. (a) corte geológica Norte – Sur “Mercedes – Colonia Palma”. (b) corte geológico Este – Oeste por el paralelo de Tacuarembó (esquema geológico debido a ausencia de perforaciones en la zona).

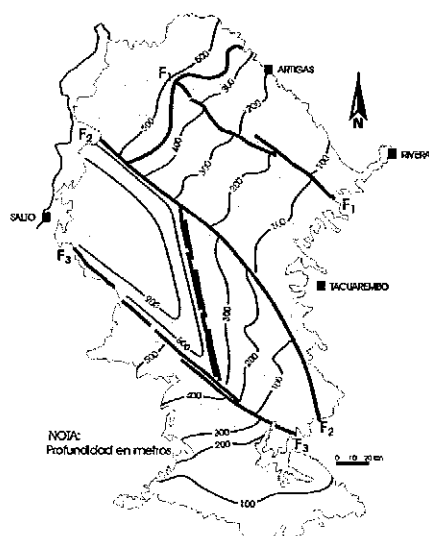


Figura 12- Isópacas del Grupo Arapey. Se exponen como líneas delgadas para facilitar la observación e interpretación del documento, pero en realidad deberían ser cintas de algunos milímetros de espesor para expresar cuantitativamente su grado de incertidumbre.

DISCUSION

Definidas las formaciones como unidades independientes limitadas entre sí por fallas de rechazos crecientes hacia el NW, la metodología de separar colada por colada dio resultados positivos en varios aspectos de la Geología Aplicada, pero uno de los más significativos ha sido poder prever el espesor total de basalto en cada punto del área con un error inferior o igual a 30 metros.

La posibilidad de conocer el espesor de basalto en cualquier punto del área ocupada por el grupo Arapey con adecuado grado de precisión, permite saber a qué profundidad se obtendrán caudales importantes de agua subterránea. Ello tiene la trascendental importancia de habilitar la planificación cuantitativa de la rentabilidad de la inversión en una obra de esa índole para aumentar o modificar la producción agropecuaria, en áreas donde no se accede fácilmente al recurso hídrico superficial.

Los valores promedio del espesor de las coladas pueden actualmente medirse con gran precisión al disponerse de cartas topográficas a escala 1/50.000 con curvas de nivel cada 10 metros. Ello permite evaluar el valor del buzamiento

o inclinación regional respecto del plano horizontal con errores muy bajos (5% del valor más probable) aplicando el método de los tres puntos (BONTE, 1958) y el espesor de cada colada con errores menores a 5 metros. El grado de precisión fue verificado comparando los valores obtenidos por la aplicación del método cartográfico con datos reales de perforaciones realizadas por el Instituto Geológico del Uruguay y ANCAP en Catalán Grande, Catalancito, Pelado y Yacaré (Dpto. de Artigas), Paso de los Toros y Salsipuedes (Dpto. de Tacuarembó) y Guichón en el Dpto. de Paysandú.

En todos los casos se han conseguido diferencias inferiores a 30 metros para las zonas donde se superponen hasta 9 derrames, lo que representa la totalidad del área donde se puede ser importante calcular el espesor total de basalto con técnicas poco costosas.

Para el caso de las asociaciones de suelos con predominio de litosoles, que cubren una extensa proporción del total del área basáltica, este método puede resultar de importancia decisiva para generar un aumento de producción cuando éste dependa del riego en ciertas épocas del año (figura 13).

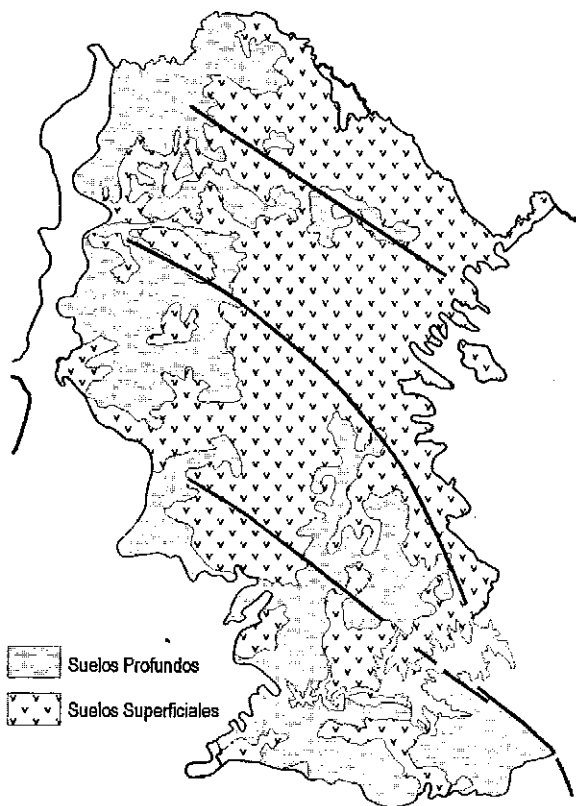


Figura 13. Asociación de suelos superficiales en el área basáltica, tomada de la carta de Suelos a escala 1/1.000.000 de la División de Suelos y Fertilizantes del MGAP (1976).

Allí puede verse que en las formaciones Los Catalanes y Curtina dominan netamente los suelos superficiales y muy superficiales, desarrollados sobre rocas de grano fino, alto tenor relativo en sílice, estructuras buzantes y/o áreas de anomalías gravimétricas negativas que sugieren bloques en ascenso isostático, en los cuales la erosión domina sobre la meteorización.

Para esas zonas de litosoles se desarrolló el "Programa Basalto" en convenio entre Facultad de Agronomía y el Plan Agropecuario del Ministerio de Ganadería y Agricultura entre 1968 y 1973 con el expreso objetivo de instalar praderas arando con zapatas (SACCONE, 1971). Las praderas de trébol se instalaban con gran vitalidad, pero las temperaturas de verano en las épocas sin lluvia impedían la reinstalación de la pradera al año siguiente.

Puede inferirse de los resultados sistemáticamente obtenidos de las experiencias de implantación de praderas en litosoles, que la posibilidad de regarlas durante las secas de verano podría resolver satisfactoriamente el problema de la reimplantación.

El área basáltica suministra dos tipos de acuíferos, según HAUSMAN y FERNANDEZ (1967):

- un acuífero fisurado dentro de las rocas basálticas propiamente dichas con caudales de 3 a 10.000 l/h a profundidades entre 30 y 50m.

- un acuífero poroso en las areniscas infrabasálticas con caudales superiores a 50.000 l/h pero a profundidades superiores a 100m y con costos de perforación y puesta en funcionamiento más elevados.

Planteado el tema en esos términos, resulta imprescindible conocer las profundidades y los caudales a esperar para poder decidir el tipo de explotación a planificar: sin riego; regando con pequeños caudales del acuífero intrabasáltico; con riego utilizando caudales sensiblemente mayores del acuífero infra-basáltico.

CONCLUSIONES

Los estudios realizados sobre el área basáltica del NW del Uruguay, que cubre 41.000 km² con grandes heterogeneidades internas, permitieron mejorar el conocimiento de varios parámetros y extraer algunas conclusiones de interés, tanto en aspectos teóricos como aplicados, que se describen a continuación:

1. Resultó conveniente aumentar la jerarquía estratigráfica y crear el grupo Arapey compuesto por 6 formaciones con características litológicas y tectónicas particulares, diferenciables entre sí y separadas por fallas regionales de rechazos importantes.

2. La totalidad de las perforaciones y relevamientos superficiales verifican la superposición entre 6 y 13 coladas en cada bloque a excepción del correspondiente a la Fm. Itapebí que posee 27 derrames.

3. El espesor de cada derrame y del total de derrames superpuestos crece de Este a Oeste, con valores promedio de 35 ± 5 m hasta 42 ± 5 m respectivamente.

4. El actual nivel de conocimientos permite medir el número de coladas superpuestas en cada punto del área de basalto aflorante y establecer el espesor de cada colada con un error inferior a 5 metros.

5. Como corolario de la conclusión anterior es posible conocer el espesor total de basalto en cada punto, con un error inferior a 30m, verificado comparando los datos obtenidos por la aplicación del método fotogeológico - cartográfico con los valores reales de 7 perforaciones.

6. Esa información permitió confeccionar por primera vez una carta con curvas de nivel de igual espesor de rocas basálticas (isópacas), que resultó ser la conclusión más importante del estudio por las posibles repercusiones económicas a corto y mediano plazo.

7. Conocer el espesor de rocas basálticas a atravesar hasta llegar al acuífero Guaraní con caudales de 50.000 l/h como mínimo, significa la posibilidad de planificar modificaciones tecnológicas en el área basáltica, incluyendo especialmente la zona de suelos superficiales y muy superficiales (litosoles), con enfoques de factibilidad económica sobre bases cuantitativas.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREIS, R. R. y FERRANDO, L. A. 1982. Sobre la existencia de Triásico en el departamento de Cerro Largo (Resumen). Boletín Proyecto N°42 IUGS-UNESCO, 5: 32. Montevideo. Uruguay.
- ARAUJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. 1995. Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Piramboia, Rosario do Sul, Buena Vista, Misiones e Taquarém-bó; Curitiba, Geociências, UFPR, 10p.
- BARBERENA, M.; ARAUJO, D. y LAVINA, E. 1985. Late Permian and Triassic Tetrapods of Southern Brazil. NGR/Winter
- BONTE, A. 1958. Introduction a la lecture des cartes géologiques. Ed. Mason y Cia. Francia.
- BOSSI, J. 1966. Geología del Uruguay. Colección Ciencias N°2. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República. Montevideo. Uruguay.
- BOSSI, J. y CAGGIANO, W. 1974. Contribución a la geología de los yacimientos de amatista del Dpto. de Artigas (R.O. del Uruguay). XXVIII Cong. Bras. Geol., Simposio N° 3, P. Alegre, Brasil.
- BOSSI, J.; CARBALLO, E.; LEDESMA, J. J. y NAVARRO, R. 1974. Resumen de los conocimientos actuales sobre los basaltos de la formación Arapey; XXVIII Cong. Bras. Geol. vol. 1; 51-60 P. Alegre, Brasil.
- BOSSI, J.; FERRANDO, L. A.; FERNANDEZ, A.; ELIZALDE, G.; MORALES, H.; LEDESMA, J.; CARBALLO, E.; MEDINA, E.; FORD, I. y MONTAÑA, J. R. 1975. Carta geológica del Uruguay. Escala 1:1.000.000. Autores Ed. Montevideo. Uruguay.
- BOSSI, J.; HEIDE, E. y de OLIVEIRA, T. 1969. Carta geológica del Uruguay. Escala 1:100.000. 1 Segmento Salto, sectores XIX y XX. pp. 1-57. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo. Uruguay.
- BOSSI, J. y HEIDE, E. 1970. Carta geológica del Uruguay. Escala 1:100.000. 4 Segmento Río Arapey, sector XVIII. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo. Uruguay.
- FALCONER, J. D. 1937. La Formación Gondwana en el Nordeste del Uruguay, con especial referencia a los terrenos eogondwánicos. Instituto de Geología y Perforaciones Boletín N° 23. Montevideo. Uruguay.
- BOSSI, J. y NAVARRO, R. 1991. Geología del Uruguay (2 vol). Departamento de Publicaciones, Universidad de la República. Montevideo. Uruguay.
- BOUQUET, L. 1943. Orientaciones generales para la investigación de aguas subterráneas en la República; Inst. Geol. Del Uruguay - memoria N° 1.
- FERNANDEZ, A. y LEDESMA, J. 1974. Criterios petrográficos de correlación en secuencias de coladas basálticas; Anais do XXVIII Congresso. 2 : 139-149. Porto Alegre. Brasil.
- FERRANDO, L. A. y ANDREIS, R. R. 1986. Nueva estratigrafía en el Gondwana de Uruguay. Actas I Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos. ARPEL. I : 295-323. Buenos Aires, Argentina.
- FERRANDO, L. y MONTAÑA, J. 1986. Esquema geológico de los alrededores de Tacuarembó. Proyecto IGCP 193 Silúrico Devónico de América Latina. IV Reunión. Tacuarembó. Uruguay.
- GANCIO, F. y APPRATTO, M. 1993. Basaltos de la Formación Arapey - in: Catedra de Geología de la Facultad de Agronomía - Geología y Recursos Minerales del Departamento de Durazno. pp: 71-79. Ed. Int. Mpal. Durazno.
- GILBOA, Y.; MERO, F.; MARIANO, I. B. 1976. The Botucatu aquifer of South America, model of an untapped continental aquifer; Journal of Hydrology, 29: 65 - 179.
- GODOY, E. y PAREDES, J. L. 1995. Acuíferos potenciales del Paraguay; Anais I Mercosul de Aguas Subterráneas: 24 - 37; Curitiba, Paraná, Brasil.
- GONZALEZ, S. y De SANTA ANA, H. 1998. Caracterización de la secuencia Eo-Mesozoica continental en la región noroccidental de la cuenca norte (Uruguay). Actas del II Congreso Uruguayo de Geología. : 43-48. Punta del Este. Uruguay.
- HAUSMAN, A. y FERNANDEZ, A. 1967. Hidrogeología de los basaltos del noroeste de Uruguay; Publ. Mimogr. Fac. Agronomía, Montevideo, Uruguay.
- LOPES, M. F. C. 1984. Agua subterránea no estado do São Paulo; Anais III Congreso Brasileiro Aguas Subt.: 305 - 316; Fortaleza, Ceará, Brasil.
- MACKINON, J. 1967. Informe sobre estratigrafía del Gondwana en la región Noroeste de Uruguay. IUGS-UNESCO. I Symposium Gondwana Geology : 973-983. Mar del Plata. Argentina.

- PADULA, E. 1972. Subsuelo de la Mesopotamia y regiones adyacentes. in Geología Regional Argentina. Ac. Nac. Cien. Córdoba, Argentina :214-235.
- RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; MAGÁLLAES, P. C.; CLEARY, R. W. 1990. Engenharia Hidrológica, ABRH editora UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 404 páginas.
- REBOUÇAS, A. C. 1994. Sistema aquífero Botucatú no Brasil; VIII Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas: 500 – 509, Recife, Brasil.
- ROUTHIER, P. 1958. Les synthèses étagées: sur la notion de types de gisements. Bull. Soc. Geol. France, 8:237-243.
- SPRECHMANN, P.; BOSSI, J. y DA SILVA, J. 1981. Cuencas del Jurásico y Cretácico del Uruguay. En Volkheimer, W. y Mussachio (Ed.) Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico. 1: 239-270. Buenos Aires. Argentina.
- TODD, D.K. 1973 Hidrología de aguas subterráneas. Ed. Paraninfo, España.