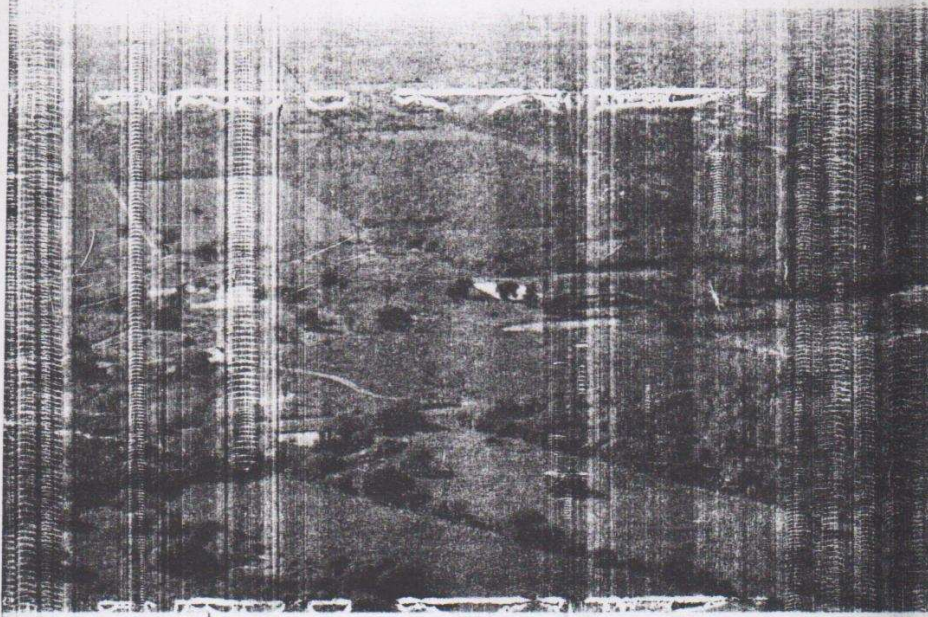


Dr. J. L. Cabrera O. 20/10/89

RECURSOS NATURALES
GEOLOGIA - HIDROLOGIA

AGUA SUBTERRANEA
CHACO PARAGUAYO



MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL
COMISION NACIONAL DE DESARROLLO REGIONAL INTEGRADO
DEL CHACO PARAGUAYO
PUBLICACION DEL DEPARTAMENTO DE ABASTECIMIENTO DE
AGUA PARA EL CHACO

PHILADELPHIA - CHACO PARAGUAYO

DICIEMBRE, 1989

Joel Luis Cabrera O.

RECURSOS NATURALES
GEOLOGIA - HIDROLOGIA

AUSPICIAN :

- *Ministerio de Defensa Nacional (MDN)*
- *Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado del Chaco (CNDRICh)*
- *Departamento de Geología del Instituto de Ciencias Básicas - UNA*
- *Asociación de Geólogos del Paraguay*

No. 1

Filadelfia - Chaco

Diciembre, 1969

CONSEJO EDITORIAL

Sergio Echeverria

Miguel Orrego

Eugenio Godoy V.

COORDINACION GENERAL

Eugenio Godoy V.

Publicación del Departamento de Abastecimiento de
Agua para el Chaco (CNDRICH - MDN)

Casilla de Correo 984
Filadelfia - Chaco
Paraguay

Telef. (091) 275

Ministerio de Defensa Nacional
Mcal. López y Vice Pdte. Sanchez
Asuncion - Paraguay

Telef. (021) 204 987

La edición
en el pro
desde su
mo rigor
gicos de
cimiento
sos.

Esta pub
tiene no.
geológica
para el
así te b
paraguay
ciones q

Los au
impor
de De
prese
su de

Se da un
el comp
de Agua

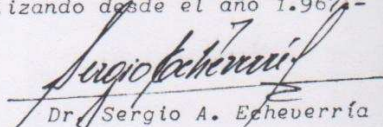
P, R E S E N T A C I O N

La edición de esta publicación científica-técnica está inspirada en el propósito que el Departamento de Agua para el Chaco mantuvo desde su creación, dirigido a evaluar acabadamente y con el máximo rigor científico el conjunto de recursos geológicos e hidrológicos del Chaco Paraguayo, partiendo de la base que sólo el conocimiento puede orientar el uso y manejo racional de estos recursos.

Esta publicación, que deseamos sea de carácter periódica, tiene por objetivo la divulgación de trabajos e investigaciones geológicas e hidrológicas realizadas por el Departamento de Agua para el Chaco y por otros organismos oficiales o privadas. Como así también, servir de medio para que los científicos y técnicos, paraguayos y extranjeros, hagan conocer sus trabajos e investigaciones que realizan sobre el Chaco.

Los artículos que se presentan en esta publicación son de gran importancia para la planificación y la ejecución de los Proyectos de Desarrollo Económico y Social del Gran Chaco Paraguayo que presenta áreas semiárida y árida, siendo el factor limitante para su desarrollo el recurso hídrico.

Se da un enfoque especial a los trabajos e investigaciones sobre el comportamiento de las aguas subterráneas que el Departamento de Agua para el Chaco viene realizando desde el año 1.967.-


Dr. Sergio A. Echeverría
Director

I N D I C E

	<i>Pag.</i>
TECTONICA Y SEDIMENTACION FANEROZOICA DE LA CUENCA DEL CHACO <i>por Dr. Ing. Fernando Wiens</i>	9
OCURRENCIA, CALIDAD Y PROPUESTA DE ESTRATIFICACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL CHACO PARAGUAYO <i>por Eugenio Godoy V.</i> .	27
METODOLOGIA DE PERFORACION DE POZOS EN EL CHACO PARAGUAYO <i>por Daniel H. Garcia, Santiago Jara G. y Dante L. Irrazabal</i> .	45
CALIDAD QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL CHACO PARAGUAYO PARA CONSUMO HUMANO, AGRICOLA Y GANADERO <i>por Sergio Echeverria, Eugenio Godoy V. y Miguel Orrego</i>	57
UTILIDAD DEL REGISTRO DE AVANCE Y SU APLICACION EN EL CHACO <i>por Santiago Jara G. y Daniel H. Garcia</i>	70
RECURSOS DE AGUAS SUBTERRANEAS DEL PARAGUAY <i>por Albert Mente y Eugenio Godoy V.</i>	82

TECTONICA Y SEDIMENTACION FANEROZOICA
DE LA CUENCA DEL CHACO
(PARAGUAY)

por

Dr. Ing. Fernando Wiens *

RESUMEN-- Se presentan resultados recientes sobre el desarrollo de la cuenca del Chaco, Paraguay. El emplazamiento sobre-corteza continental y la subsiguiente subsidencia y sedimentación son controlados en el paleozóico por efectos del ciclo Brasiliano; sufriendo una reorganización en el mesozóico por el ciclo Sudatlántico. El lineamiento estructural hacia el NW y NE controla asimismo la sedimentación marina, glacial y continental paleozóica en subcuencas y altos, mientras que la deposición de sedimentos continentales mesozóicos se concentra a lo largo de subcuencas nuevas o reactivadas. El ciclo Andino no afecta la organización de la cuenca del Chaco, pero crea una fuente de sedimentación desde el oeste que recubre el Chaco y lo convierte en una planicie cuaternaria.

ABSTRACT-- Recent investigation results on the development of the Chaco basin, Paraguay, are presented. The emplacement on continental crust and the subsequent subsidence and sedimentation are controlled during paleozoic by effects of the ciclo Brasiliano; suffering a reorganization during mesozoic by the ciclo Sudatlántico. Structural lineaments in NW and NE directions control as well marine, glacial and continental paleozoic sedimentation in subbasins and highs, while the deposition of continental mesozoic sediments is concentrated along new or reactivated subbasins. The ciclo Andino leaves without influence the organization of the Chaco basin, but originates a source of sedimentation from the west, recovering the Chaco and converting it into a wide quaternary plain.

INTRODUCCION

La información presentada es entendida como un intento de compilar recientes resultados sobre la tectónica y sedimentación fanerozóica de la cuenca del Chaco (Paraguay), con la integración parcial de la cuenca del Paraná (Paraguay/Brasil).

ORIGEN DE LAS CUENCAS CHACO Y PARANA

El basamento cristalino y su desarrollo que causarían el origen de las cuencas Chaco y Paraná son poco conocidos. Una evidencia partiendo de un sistema tectónico distensional como factor inicial para la formación de las cuencas es aceptada como un posible modelo, careciendo aún de una confirmación plenamente aceptada.

Depósitos del tipo 'molasse' de edad eo cámbrica (incluidos en el Grupo Itapucumí; Fig. 1) son considerados como los primeros sedimentos dentro de un sistema

*Casilla de correo 166, Asunción, Paraguay

tectónico distensional. Son interpretados como material erosionado de los flancos positivos originados en el ciclo orogénico Brasiliano (680-450 m.a.) y relacionados con magmatitas ácidas. La distribución y el espesor de la 'molasse' hasta hoy conocidos (e.g. en el subcratón Río Apa) es restringida y no se explicaría aún su representatividad para toda una cuenca.

El modelo de una reducción de espesor de la corteza terrestre por movimientos exclusivamente de distensión y una subsidencia posterior igualmente no ha sido explicado satisfactoriamente.

Sin embargo, se deberá aceptar la relación íntima entre el ciclo Brasiliano (680-450 m.a.) y la formación de las cuencas Chaco y Paraná (a partir de 440 m.a.) a pesar de que el inicio de la manifestación de las cuencas se confirma recién algo después de la orogenia.

El ciclo Brasiliano es principalmente un evento tectónico de compresión, muy intenso y de larga duración; Fig. 2. Diferentes áreas cratonales aisladas se llegan a soldar como resultado de fenómenos de colisión de orógenos y retrocediendo cinturones móviles interpuestos, originando un magmatismo importante y causando una remobilización isotópica en unidades pre-existentes. Granitización y deformación ocurrieron alrededor de 680-580 m.a. (Cordani, 1984). Un período de enfriamiento se constata de 500-450 m.a. (Cordani, 1984) y representa probablemente el inicio del mecanismo de subsidencia a través del cual fué creada la depresión inicial de las cuencas Chaco y Paraná. Los primeros sedimentos fanerozóicos depositados son de edad ordovícica (~ 440 m.a.; Zalan, 1987).

Una vez iniciada la sedimentación, secuencias silúricas y devónicas son depositadas en las áreas de subsidencia (Wiens, 1988). Otras fases de subsidencia siguen en las cuencas con diferentes mecanismos iniciales.

En conclusión: La cuenca del Paraná es el producto de tres cuencas fanerozóicas superpuestas (siluro/devónico, permo/carbonífero y jurásico superior/cretácico inferior); mientras que la cuenca del Chaco indica cuatro cuencas fanerozóicas intercaladas (siluro/devónico, permo/carbonífero, jurásico superior/cretácico inferior y cretácico superior/cuaternario). Las fases de subsidencia se separan por períodos erosionales, períodos sin deposición o tasas bajas de sedimentación (devónico superior/carbonífero inferior, triásico/jurásico inferior y cretácico superior).

SUBSIDENCIA DE LA CUENCA DEL CHACO (Fig. 3, Fig. 4)

Primera fase: Siluro/Devónico.

Como consecuencia de la orogenia Brasiliana sedimentos clásticos silúricos se depositan en una primera fase de subsidencia dentro de una extensa bahía abierta hacia el proto-pacífico con orientación hacia el oeste/suroeste y a lo largo de un margen continental pasivo (Wiens, 1988; Fig. 5, Fig. 6).

Una discor
la tran c
transgresi
estructura
Paraná; i
ca del Cha

Segunda fa

El pe
cial. La
glaciari
ciclo tra

El área oc
la subeue
Carandí
por un lav
segunda f:

Se refir
eólico, re
condic
y el bran
de subsi

Tercera f

El e
rante est
La forma
establi
regres
de horst
sidera
y la m
carburos
biente
guraci
establi

Cuarta fa

La f
riodo
del Chaco
terminan
mane
reas sub

Una discordancia clara entre el silúrico superior y el devónico inferior indica la transición de un margen pasivo hacia una fase tectónica de compresión: la transgresión devónica está limitada hacia la región norte del Chaco, con altos estructurales separando esta zona de la parte sur del Chaco y de la cuenca del Paraná; Fig. 7. Al terminar la sedimentación devónica concluye la 'primera cuenca del Chaco'.

Segunda fase: Permo/Carbonífero.

El periodo del permo-carbonífero es caracterizado por un ambiente periglacial. La segunda fase de subsidencia es iniciada por el sobrepeso causado por glaciares continentales, seguidos por sedimentos voluminosos originados por el ciclo transgresivo/regresivo del permo-carbonífero (Zalan, 1987).

El área ocupado por sedimentos permo-carboníferos se encuentra restringido hacia la subcuenca de Gurupayty y el bajo de Bahía Negra en el norte y la subcuenca de Carandaity en el oeste; Fig. 8. La extensión de esta sedimentación es indicada por un levantamiento estructural general en el Chaco central, terminando así la segunda fase de subsidencia de la cuenca del Chaco (Wiens, 1988).

Se reinicia la sedimentación durante el triásico medio en un ambiente fluvial-eólico, rellenando depresiones remanentes. Luego, la sedimentación cambia hacia condiciones desérticas, sobre todo en las áreas norteñas, recubriendo la cuenca y el basamento adyacente. Durante el triásico y el jurásico inferior la razón de subsidencia es muy baja.

Tercera fase: Jurásico superior/Cretácico inferior.

Extensas áreas de la cuenca y regiones del basamento fueron afectadas durante este periodo por el ciclo orogénico Sudatlántico (tectónica extensional). La forma, los márgenes y la configuración en general de las cuencas sedimentarias establecidas anteriormente cambian sustancialmente. Magmatismo, transgresiones/regresiones locales (Fig. 9) y una restructuración (predominantemente sistemas de horst-graben) son los efectos documentados en las cuencas. Esta fase es considerada como la más importante para el establecimiento de estructuras 'finales' y la maduración de materia orgánica (donde existe!) para la generación de hidrocarburos (rocas generadas y de almacenamiento paleozóicas, como también en ambientes sin-formacionales); Zalan, 1987. Como demostrado en Fig. 10, la configuración final de subcuencas y altos estructurales en la cuenca del Chaco quedan establecidos al concluir esta fase de subsidencia.

Cuarta fase: Cretácico superior/Cuaternario.

Un importante ciclo orogénico (ciclo Andino) alcanza su máximo en este periodo. Las cordilleras de los Andes que se imponen hacia el oeste de la cuenca del Chaco llegan a representar una fuente importante para sedimentos jóvenes y terminan con toda influencia marina posible desde el oeste. El Chaco mismo permanece estructuralmente estable, con excepciones apenas locales a lo largo de áreas subcratonales, como en el área del bajo de Bahía Negra y en el bloque de A-

sunción. Subcuencas y altos mesozóicos son recubiertos con potentes y extensos sedimentos, derivados de las cordilleras andinas (morfológicamente más elevadas). Apenas reajustes tectono-sedimentarios son observados en estas formaciones recientes. El Chaco se transforma en una extensa planicie cuaternaria (Fig. 11).

ESTRUCTURAS

Casi toda sedimentación de las cuencas Chaco y Paraná se ve controlada por lineamientos estructurales hacia el NW y el NE (Fig. 11, Fig. 12); indicando también una repetida reactivación a lo largo de estas zonas de debilidad tectónica. Movimientos verticales y horizontales sucedieron generalmente a menor escala, con excepción a la activación mesozóica en las zonas de Pirity y Bahía Negra (Wiens, 1988). Sin embargo, las reactivaciones estructurales han tenido suficiente influencia para controlar la ubicación de depocentros y altos intrabasinales, como también la distribución de facies sedimentarias. En el desarrollo de la cuenca del Chaco dominaba una tectónica de bloques limitados por fracturas orientadas hacia el NE y NW. Estos bloques también sufrieron movimientos invertidos. En caso de una inversión vertical pueden haber ocurrido migraciones de depocentros o inversiones de depocentros hacia altos.

Fig. 7 es un mapa de isópaquas del devónico. Un marcado control estructural hacia el NW es observado; específicamente a lo largo del alto de Lagerenza; subdividiendo la subcuenca de Carandaity hacia el oeste de la subcuenca de Curupayty y el bajo de Bahía Negra hacia el noreste.

Fig. 8 indica la distribución de isópaquas del carbonífero. Otra vez, la tendencia estructural hacia el NW es predominante con una pronunciación del alto de Lagerenza y un depocentro claro en la subcuenca de Curupayty, indicando áreas reducidas en extensión y espesor de sedimentos para la subcuenca de Carandaity.

Durante el mesozóico se hace efectiva una reorganización geométrica-estructural general de las cuencas del Chaco y Paraná (Fig. 9, Fig. 13). Estructuras predominantes hacia el NE controlan la evolución geológica a partir de este período. En la cuenca del Chaco se desarrollan y se aíslan nuevos depocentros (subcuencas de Pirity y Pilar; bajo de Bahía Negra), bajos sedimentarios paleozóicos quedan restringidos (subcuenca de Curupayty) o se transforman en plataformas (subcuenca de Carandaity) y altos estructurales son levantados (altos de Fte. Olimpo, Boquerón y Pte. Hayes).

El sistema de la evolución de las subcuencas del Chaco en relación a una repetida reactivación tectónica de zonas de fracturamiento, inversión y migración de depocentros ha sido esquematizado en perfiles verticales de la Fig. 3.

Es importante aclarar, que las orientaciones estructurales más pronunciadas hacia el NW y NE nunca coincidieron en tiempo con el apogeo de sus reactivaciones. Los sedimentos devónicos y carboníferos se controlan en su deposición según una activación estructural hacia direcciones NW. En este tiempo los lineamientos estructurales hacia el NE se encuentran notablemente inactivos. Durante el mesozóico

predomina
el NW per
siempre es

Los mayores
manecei su
pos de que

a. L
resulta
El basamen
renciai na
de la cen
nes estruc

b. C
sos (Zaire
- Caledo
un marg
fico hacia
marinos
- Echerin
entre secu
cia con
- Tardi
nes de are
- Finih
mentos

c. C
- Ciclo tuc
tectónica
y jurás
- Ciclo And
de las cord

d. Du
tónicos de
estructu
estructu
cia el Ne
manece t
rales lo al

s
5).
en-

predomina una reactivación estructural hacia el NE, mientras direcciones hacia el NW permanecen secundarias. Estructuras complementarias hacia N-S y E-W siempre están presentes, pero subordinadas.

Los mayores lineamientos tectónicos se pueden trazar hasta el proterozoico y permanecen suavemente activas hasta hoy día (Fig. 11, Fig. 12; distribución de tipos de suelo - área Bahía Negra; terremotos suaves recientes - área Asunción).

CONCLUSIONES

(Fig. 14, Fig. 15)

a. La cuenca del Chaco se emplazó sobre áreas de corteza continental como resultado directo y subsiguiente del ciclo Brasiliano eocámbrico (680-450 m.a.). El basamento es un complejo sistema de bloques con zonas de fracturación preferencial hacia N45°-65°W y N50°-70°E; Fig. 16. La evolución tectono-sedimentar de la cuenca fanerozoica del Chaco está íntimamente relacionada con reactivaciones estructurales seguidas a lo largo de estos lineamientos tectónicos; Fig. 17.

b. Ciclos orogenéticos paleozoicos se pueden subdividir en diferentes pulsos (Zalan, 1987):

- Caledónico (silúrico superior / devónico inferior): Marcado por el cambio de un margen continental pasivo hacia el oeste en una bahía amplia del proto-pacífico hacia un margen continental activo y una discordancia entre los sedimentos marinos del silúrico y devónico.
- Eohercínico (devónico superior / carbonífero inferior): Marcado por el hiatus entre secuencias devónicas y carboníferas y el cambio de un ambiente marino hacia condiciones glaciales y continentales.
- Tardihercínico (pérmico medio): Marcado por voluminosas y extensivas formaciones de areniscas (confirmado hasta ahora apenas en la cuenca del Paraná).
- Finihercínico (pérmico / triásico): Marcado por la discordancia entre sedimentos paleozoicos y mesozoicos.

c. Ciclos orogenéticos mesozoicos se pueden subdividir en dos eventos:

- Ciclo Sudatlántico (triásico / jurásico inferior): Marcado por una intensa tectónica distensional (rifting) y las discordancias entre secuencias triásicas y jurásicas.
- Ciclo Andino (cretácico superior / terciario): Marcado por el levantamiento de las cordilleras andinas y el relleno sedimentario de cuencas mesozoicas.

d. Durante el paleozoico se registran en la cuenca del Chaco eventos tectónicos de compresión con tendencias preferenciales hacia el NW como influencia estructural principal; Fig. 17. Durante el mesozoico son dominantes movimientos estructurales de una tectónica distensional con lineamientos preferenciales hacia el NE; Fig. 16, Fig. 17. Durante el ciclo Andino la cuenca del Chaco permanece tectónicamente estable, registrándose apenas algunos reajustes estructurales locales.

REFERENCIAS

- CORDANI, U.C. et al., 1984: Estudo preliminar de integraçao do pre-cambriano com os eventos tectonicos das bacias sedimentares brasileiras.- Bol. Ciencia - Tecnica - Petróleo, Seção: Expl. de Petróleo, Publ. Nr. 15, Petrobras - Cenpes - Sintep, Rio de Janeiro.
- WIENS, F., 1988: Phanerozoic tectonics and sedimentation of the Chaco basin.- Int. consulting report, Asunción.
- ZALAN, P.W., 1987: Tectónica e sedimentação da bacia do Paraná. - Anais do III. Simp. Sul-Brasileiro de Geologia, Curitiba.

* * * * *

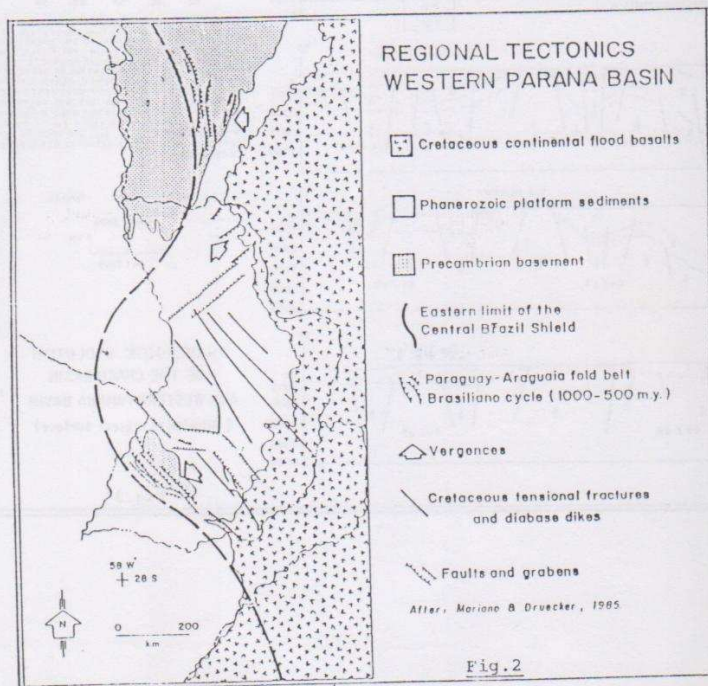
Fernando Wiens se desempeña como Coordinador Ejecutivo para diferentes programas de exploración y explotación mineral y de hidrocarburos en Paraguay. Durante 6 años participó en tareas de exploración mineral en Paraguay oriental como Geólogo de Proyecto para la The Anschutz Corp., dando impulsos importantes para la evaluación del potencial mineral. Participó durante 2 años en tareas de exploración para oro y berilo en Brasil y Argentina. Con la Occidental de Paraguay, Ipc., se desempeñó durante 3 años como Geólogo Coordinador para la exploración de hidrocarburos en el Chaco paraguayo. Obtuvo el título de Ing. Geólogo en la Universidad de Kiel (Alemania Federal) y el título de Dr. en Geología en la Universidad Técnica de Clausthal (Alemania Federal).

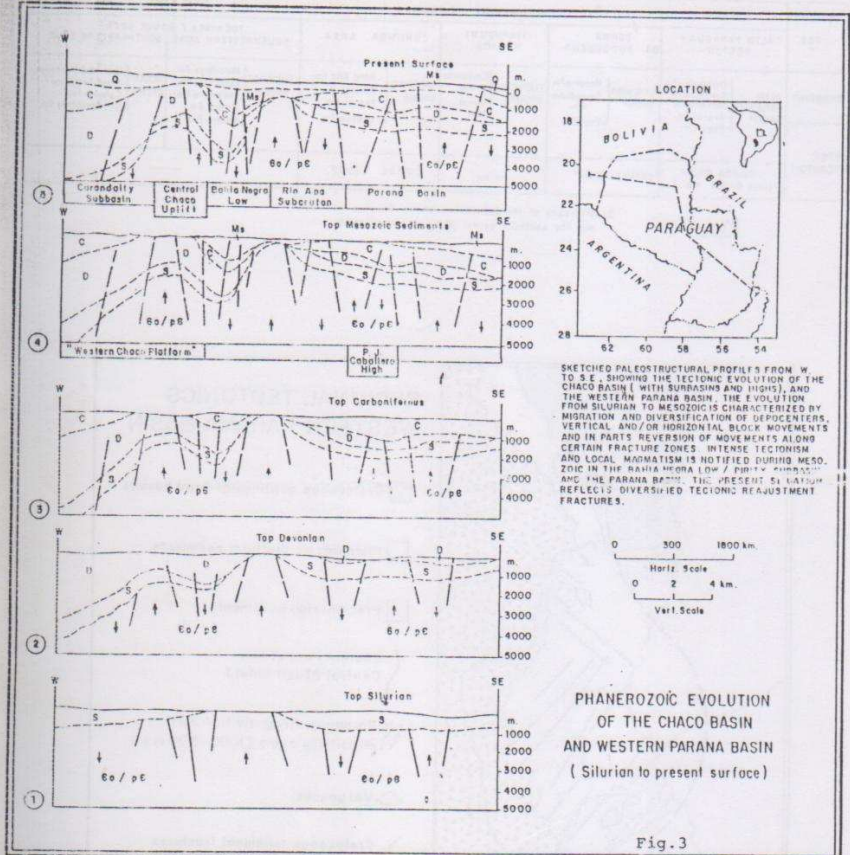


AGE	REGION (BASINS)					
	ALTO PARAGUAY REGION	SERRA DA BOGUEUENA	ITAPUCUMI REGION	CORUMBA AREA	TUCAVACA / BOQUI AREA SOUTHWESTERN ZONE SOUTHEASTERN ZONE	
CAMBRIAN	ALTO PARAGUAY GROUP (Damonil Fm., Sagolha Fm., Ratona Fm., Araras Fm., Puço Fm.)	CORUMBA GROUP (Bocaina Fm., Ceraadina Fm., Puço Fm.)	ITAPUCUMI GROUP (Carborate Fm., Boxal Unit)	JACADIGO GROUP (Bom Alto Fm., Corrego dos Pedras Fm., Urucum Fm.)	TUCAVACA GROUP (Murciaboga Fm., Passenema Fm., Bocimino Fm., Maloca Fm., Parara Fm.)	BOQUI GROUP (Undivided Egeossynclinal Sequence, Cahape Fm., San Francisco Fm.)
UPPER PROTEROZOIC	CUIABA GROUP (incl. BAUKI Fm.)	CUIABA GROUP	—	CUIABA GROUP	—	

Fig. 1

Stratigraphy of the Cambrian of the Rio Apa Subcraton and the southern border of the Guaporé Shield.

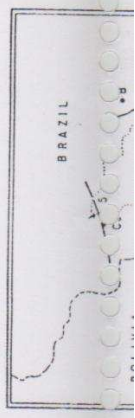




SKETCHED PALEOSTRUCTURAL PROFILES FROM W TO SE, SHOWING THE TECTONIC EVOLUTION OF THE CHACO BASIN (WITH SUBBASINS AND HIGHS), AND THE WESTERN PARANA BASIN. THE EVOLUTION FROM SILURIAN TO MESOZOIC IS CHARACTERIZED BY MIGRATION AND DIVERSIFICATION OF DEPOCENTERS, VERTICAL AND/OR HORIZONTAL BLOCK MOVEMENTS AND IN PARTS REVERSION OF MOVEMENTS ALONG CERTAIN FRACTURE ZONES. INTENSE TECTONISM AND LOCAL MAGMATISM IS NOTIFIED DURING MESOZOIC IN THE BAHIA NEGRA LOW / PARANA BASIN AND THE PARANA BASIN. THE PRESENT DAY TECTONIC REFLECTS DIVERSIFIED TECTONIC REAJUSTMENT FRACTURES.

PHANEROZOIC EVOLUTION OF THE CHACO BASIN AND WESTERN PARANA BASIN (Silurian to present surface)

Fig. 3



EFFECTS OF THE
 (EUS) AND
 COL ON
 CTE ED BY
 REPOCIENTERS,
 K. M. MENTIS
 ST. AND
 TECTONISM
 DUP. MESO.
 (Y. BASIN
 AT BITUMINATION
 MEANT

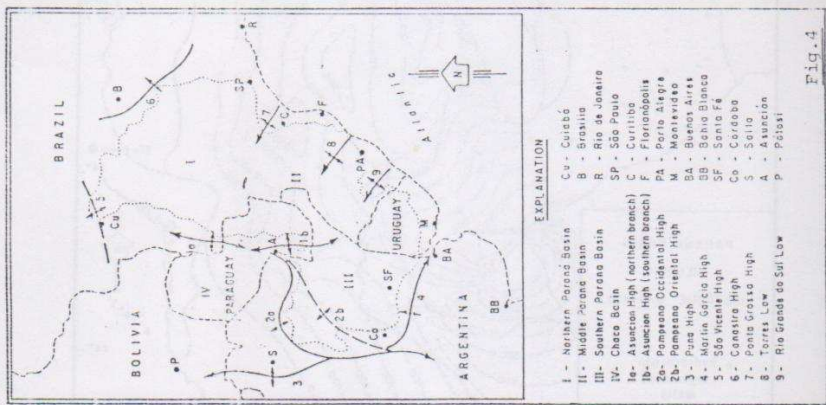


Fig. 4

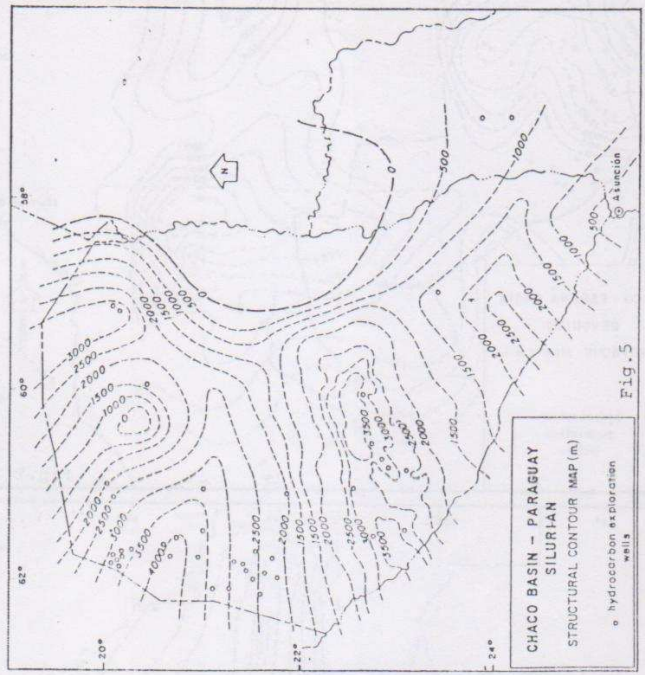
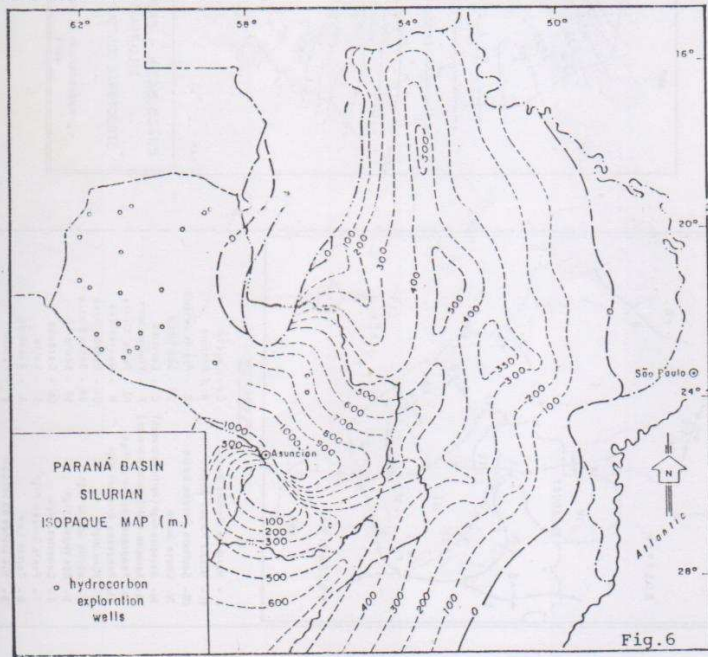
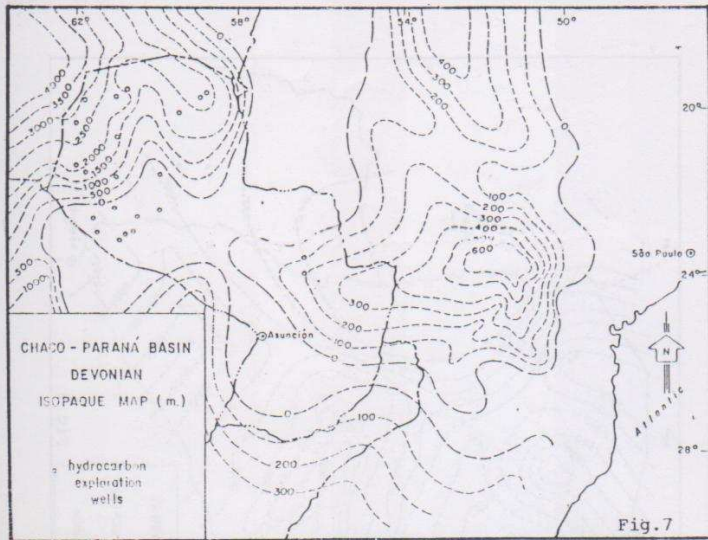
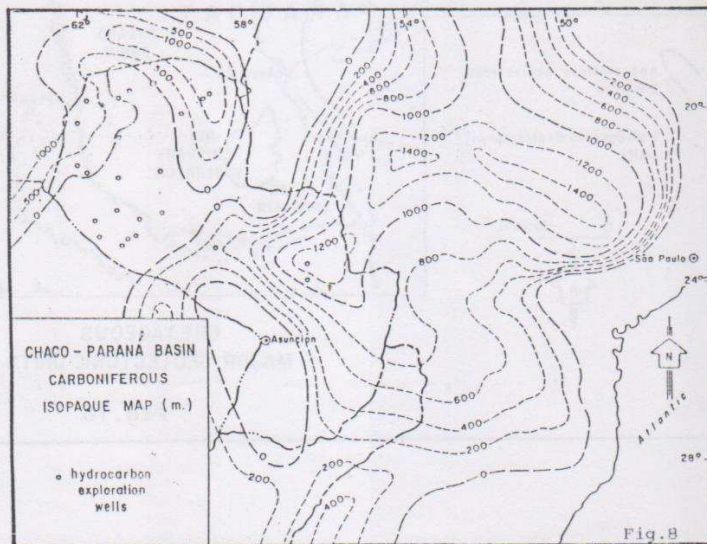
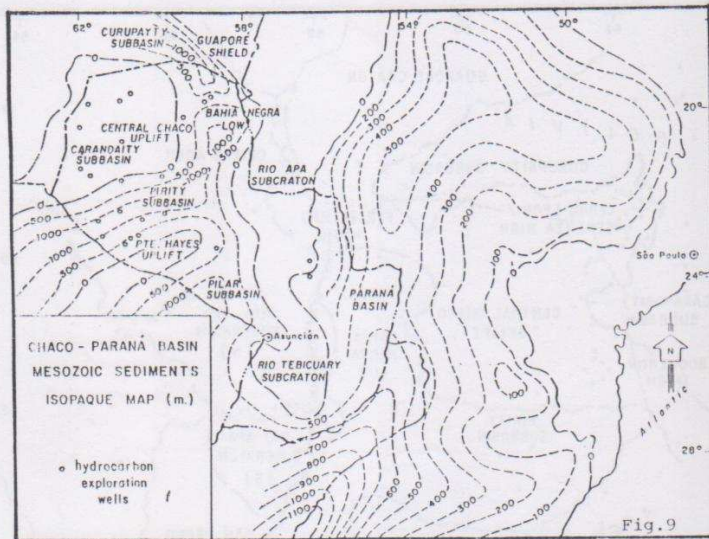
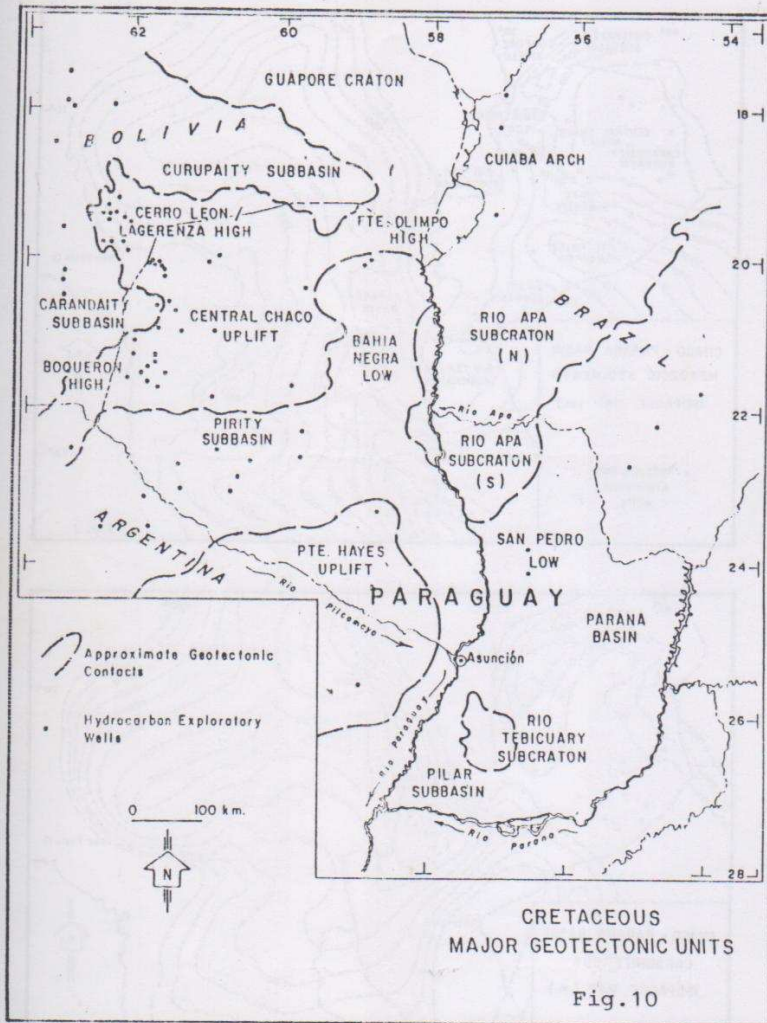
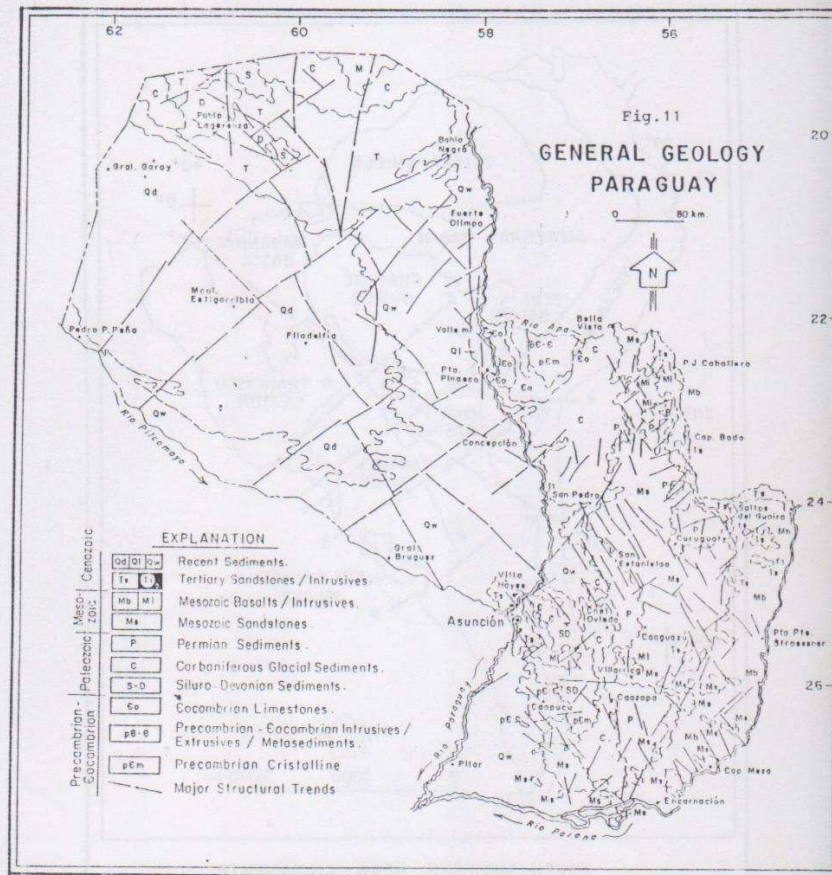


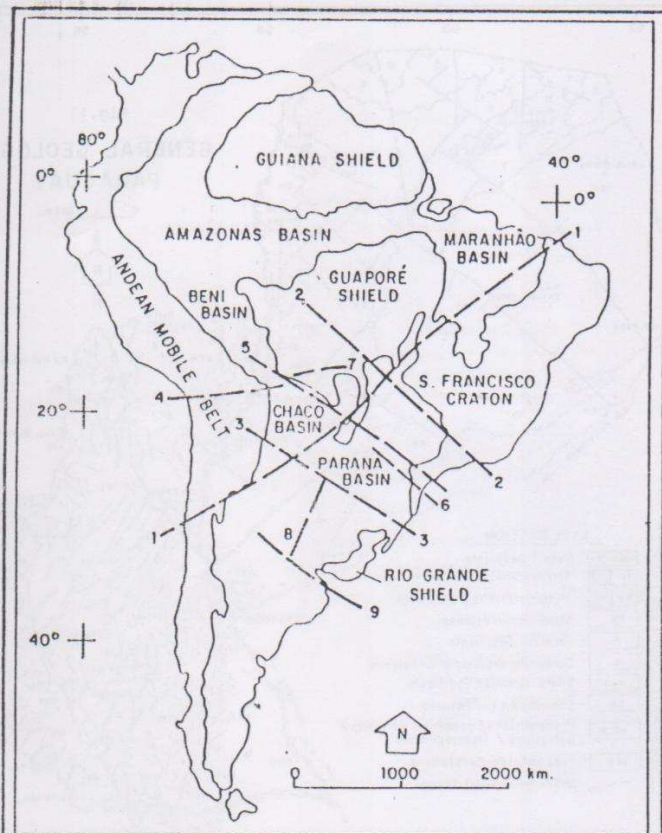
Fig. 5









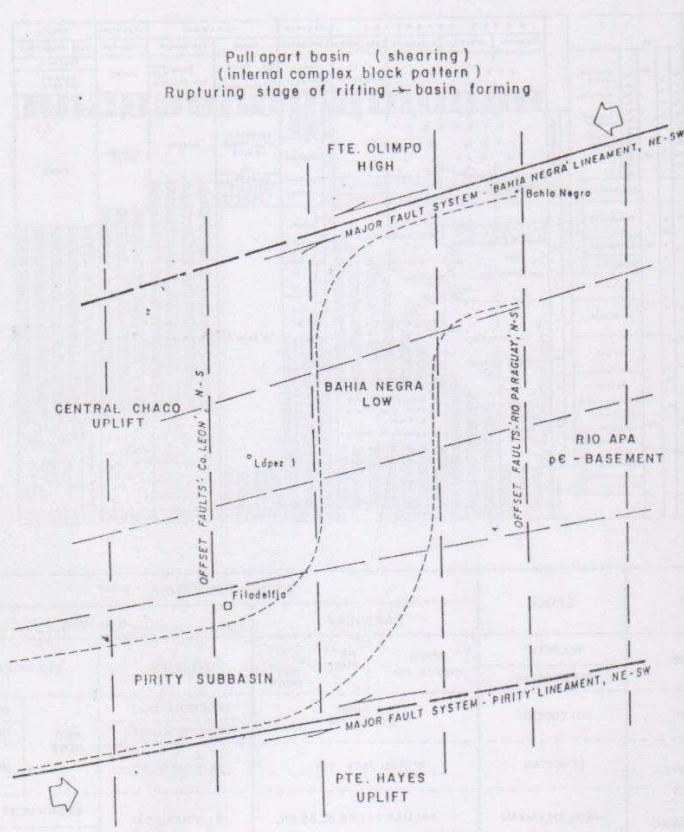


SOUTH AMERICAN MEGA - LINEAMENTS

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1.- Transbrasiliana Lineament | 6.- Ponta Grossa Arch |
| 2.- Alto Parnaíba Arch | 7.- Rio Mercedes Line |
| 3.- Torres Lineament | 8.- Pampeano Oriental Arch |
| 4.- Arica Elbow Zone | 9.- Martín García Arch |
| 5.- Chiquitos Line | |

Adaption after: Jones, 1985 and Schobbenhaus, 1984.

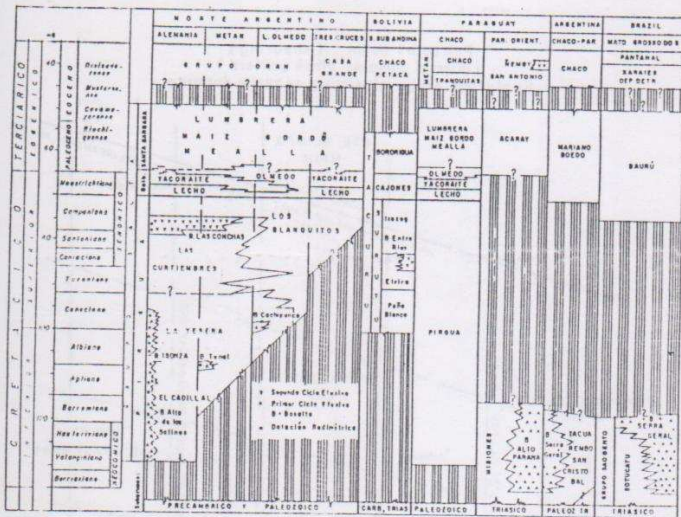
Fig, 12



Mesozoic rift tectonic, model for the central - northeastern Chaco

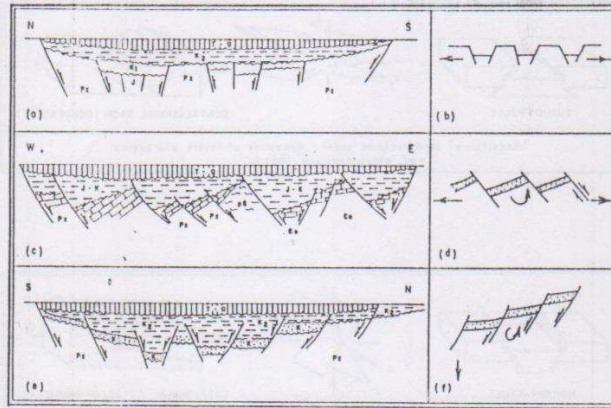
Fig. 13

Fig. 15
CRETACEOUS STRATIGRAPHIC COLUMNS - CENTRAL SOUTH AMERICA



PERIOD	EPOCH	GROUP / FORMATION / UNIT			
		PARAGUAY		BOLIVIA	
QUATERNARY	HOLOCENE	UPPER CHACO FM.	WET ¹ QUAT. DRY ¹ QUAT.	CHACO FM.	CHACO FM.
	PLEISTOCENE				
TERTIARY	PALEOGENE	LOWER CHACO FM.		PAUCERNA UNIT PEGA PEGA UNIT	UNIT C UNIT B UNIT A
UPPER CRETACEOUS	SENONIAN	ADRIAN JARA FM.		EL PORTON GR.	
UPPER CARBONIFEROUS	PENNSYLVANIAN	PALMAR DE LAS ISLAS GR.		EL PRADO FM.	ESCARPMENT FM. TUPAMBI / TARIJA FM.
LOWER DEVONIAN	EMSIAN	SAN ALFREDO GR.	UPPER FM. LOWER FM.	SAN SANTIAGO GR. ROBORE FM.	LOS MONOS FM. HUAMAMPAMPA FM. ICLA FM.
UPPER SILURIAN	LUDLOVIAN	CERRO LEON GR.		EL CARMEN FM.	STA ROSA GR. LA PAZ GR.
TOCAMBRIAN	RIPHEAN	ITAPUCUMI GR.		MURCIELAGO GR. TUCAVACA / BOQUI GR.	SEQ. CORDILLERA OR. a
PRECAMBRIAN	PROTEROZOIC			GUAPORE SHIELD	BASAMENTO CRIST.
	ARCHAEAN				

STRATIGRAPHIC CORRELATION: NORTHERN CHACO (PARAGUAY) - SOUTHEASTERN BOLIVIA 1 - BOLIVIAN CHACO 2



CO
 UNIT C
 UNIT B
 UNIT A
 MEMB. FM.
 TATAIA FM.
 ONOS FM.
 PAMPA FM.
 OS GR.
 AZ GR.
 DI. RA OR.
 B
 EN CRIST.

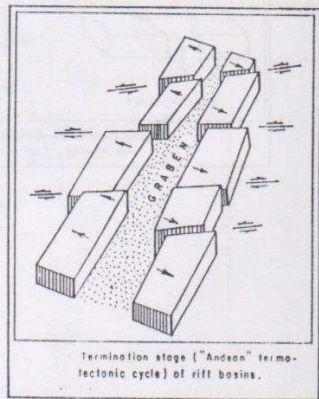
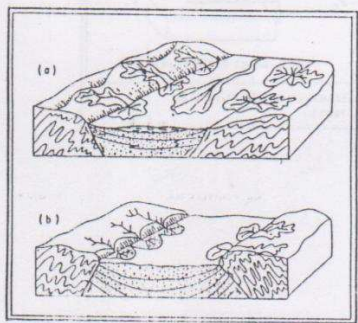


Fig.16: Modelado para la formación de subcuencas bajo influencia de tectónica distensional (rifting).

d

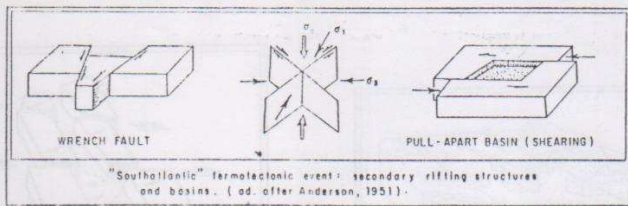
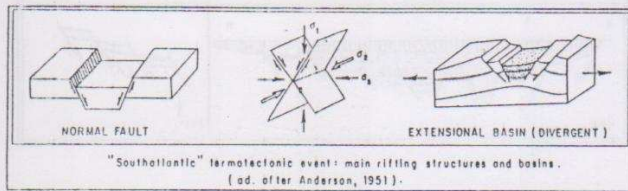
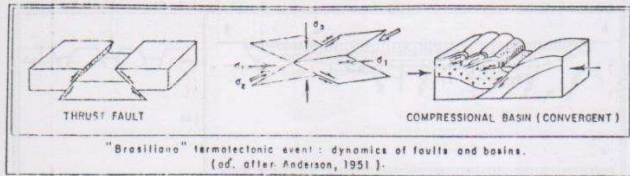


Fig. 17

C JI

RESUM
varins
la
agu
los ac
disu. bl
ta de ur
ABS
Parar
watu
the
and
for a ta

El C
extiende
el oes
en el c
(Octubre
tacion m
promed
vientos
Aparte de
sur, s

La r
ral (c
y vegeta
des re
de Inurte

En
es el

* Desarrollo de
Proyecto
Departamento
Filadelf

OCCURRENCIA, CALIDAD Y PROPUESTA DE ESTRATIFICACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL CHACO PARAGUAYO

por

Eugenio Godoy V. *

RESUMEN - - Agua subterránea se presenta en todo el Chaco Paraguayo, al sur del Paralelo 21° S, en varios niveles a diferentes profundidades, constituyendo un sistema hidrogeológico regional. Debido a la presencia de sales evaporíticas entre los sedimentos que rellenan la cuenca del Gran Chaco, las aguas subterráneas presentan elevados contenidos en sales limitando su utilización. Por otro lado, los acuíferos del Chaco presentan cuestiones de estratificación de aguas subterráneas con una distribución en franjas paralelas a la dirección del flujo.

Se presenta una síntesis de la ocurrencia y calidad de las aguas subterráneas y propuesta de un esquema de unidades hidrogeológicas taxonómicas del Chaco Paraguayo.

ABSTRACT - - Groundwater is known to be widespread in the Paraguayan Chaco Basin, south of the 21st Parallel. The presence of a vast hydrogeological regional system has been acknowledged. However, water use for different purposes is inhibited by a high content of evaporitic salts, forming part of the Gran Chaco Basin sedimentary in-filling.

Furthermore, aquifers of the Chaco Basin give origin to groundwater stratification, and exhibit a parallel fringe-like distribution in the direction of the flow.

A synthesis of the occurrence and quality of the groundwater is presented, and a scheme for a taxonomical classification of the hydrogeologic units of the Paraguayan Chaco Basin is proposed.

INTRODUCCION

El Chaco Paraguayo es una vasta llanura (246.955 km²) que se extiende con una pendiente suave desde el límite con Bolivia en el oeste hasta el río Paraguay en el este. El clima es semiárido en el noroeste y subhúmedo en el sureste con veranos lluviosos (Octubre a Abril) e inviernos secos (Mayo a Septiembre), precipitación media anual variable entre 500 a 1.400 mm, temperatura promedio anual de 25°C (máxima de 45°C y mínima de menos de 0°C), vientos fuertes norte-sur y humedad relativa entre 45 y 65 %. Aparte de las lluvias, el río Paraguay al este y el Pilcomayo al sur, son los únicos cursos de agua perennes importantes.

La integración de los distintos componentes del sistema natural (clima, el relieve y consecuente topografía y drenaje, suelos y vegetación), permite dividir el Chaco Paraguayo en tres grandes regiones ambientales: Chaco Seco, Chaco Deprimido y Planicie de Inundación del río Pilcomayo (Fig. 1).

En la región del Chaco Seco, también denominado Chaco Alto, es el agua subterránea el recurso más importante, debido a la

* Desarrollo de Recursos Hídricos del Chaco Paraguayo
Proyecto PAR/88/009 - Gobierno Nacional / PNUD
Departamento de Agua para el Chaco (CNDRICh - MDN)
Filadelfia - Paraguay

ausencia de cursos de aguas superficiales perennes. Ante la creciente demanda del agua subterránea, los acuíferos de esta región pueden ser considerados como los más investigados en el Paraguay. Investigaciones que tienden a incrementarse para cuantificar la ocurrencia, el flujo, la recarga, la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, requisitos fundamentales para el uso racional de este recurso.

Los acuíferos de las regiones del Chaco Deprimido y de la Planicie de Inundación del río Pilcomayo, por la elevada concentración de sales que presentan, han recibido menos estudios.

A nivel regional, tanto los acuíferos del Chaco Seco, de la Planicie de Inundación del río Pilcomayo y del Chaco Deprimido, constituyen un solo sistema hidrogeológico, diferenciados, principalmente, por la calidad química de las aguas que contienen.

En este trabajo se presenta una síntesis de la ocurrencia y calidad de las aguas subterráneas y propuesta de un esquema de unidades hidrogeológicas taxonómicas del Chaco Paraguayo, al sur del Paralelo 21° S.

OCURRENCIA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Los acuíferos de la cuenca del Gran Chaco constituyen a nivel regional un solo sistema hidrogeológico, aunque pueden presentar a nivel local diferencias en detalle, ocupada por diferentes sistemas de flujos de aguas subterráneas.

Para una mejor comprensión de las formas de ocurrencia de los acuíferos del Chaco Paraguayo al sur del Paralelo 21° S, es conveniente dividirlos en acuíferos freáticos y confinados/semi-confinados.

Acuíferos freáticos

Los acuíferos freáticos se presentarían hasta una profundidad de 45 m en el oeste, en el límite con Bolivia, profundidad que paulatinamente va disminuyendo hacia el este, así en el área de Mbutu Retá se presentan hasta los 40 m; en el área de Mcal. Estigarribia hasta una profundidad de 30 m; en el área de Filadelfia hasta los 12 m; en la zona de transición entre el Chaco Seco y Deprimido hasta los 5 m de profundidad y más al este se presentarían hasta los 2 m de profundidad. En algunos casos presentan condiciones de confinamiento local.

En la Fig. 2 se presenta un esquema de zonificación de los acuíferos freáticos del Chaco Paraguayo.

Zona 1 - - De acuerdo a datos disponibles, no existen acuíferos freáticos en esta zona. Pero, ante la presencia de acuíferos colgados por debajo de las lagunas de Yrendague y Lafaye, no se descarta la posibilidad de condiciones similares por debajo de

otras

Zona
restr
cia.
pa. ói
es de
espec
en ier

Zona
en lo
derac
3.000
peque
en "a
es un
recon
nivel
la pa
El ca
veces
condic

Zona
comayo
El ac
donado
ros f
hic oc

Zona
en la
que de
Trans
inu da
de es
ríos
acu fe

Acuífero

Ac
todo
ni le
debajo
debajo
má mc
encier
despla
mer r,
do inc
de ros

otras lagunas de la zona.

Zona 2 - - El acuífero freático se presenta en forma local, restringidos a paleocauces estrechos y a cuerpos de agua superficial. Están constituidos por arena fina, a veces con una participación pequeña de arena mediana. La potencia de estos acuíferos es de 12 m en Mbutu Retá y Puesto Santo Domingo, con caudales específicos de 2.500 litros / hora por metro de descenso (1/h/m) en media.

Zona 3 - - El agua subterránea se presenta como acuífero freático en los paleocauces colmatados, que es el rasgo fisiográfico más destacado de esta zona. El ancho de los paleocauces varía de 50 a 3.000 m y están formados por arena fina, frecuentemente con una pequeña proporción de limo. La arena limosa ocurre casi siempre en la superficie, con un espesor de 0.5 a 5 m. La parte inferior es una arena fina de 5 a 12 m de espesor, bien seleccionada y redondeada. El espesor del acuífero freático varía de 8 a 2 m, su nivel se encuentra a una profundidad de aproximadamente 12 m en la parte occidental y de 3m en la oriental (Naciones Unidas, 1978). El caudal específico medio de los pozos es de 1.800 l/h/m. A veces, intercalaciones lenticulares de material impermeable crean condiciones de confinamiento en los paleocauces colmatados.

Zona 4 - - Corresponde a la planicie de inundación del río Pilcomayo, de expresión muy bien definida en las fotografías aéreas. El acuífero freático se presenta en los meandros y canales abandonados. Esta zona presenta mayor número de ocurrencia de acuíferos freáticos en relación a la Zona 2, con características hidrodinámicas similares.

Zona 5 - - El acuífero freático esta subordinado, principalmente, en las planicies de inundación de los numerosos ríos y riachos que desaguan al río Paraguay. En algunos casos, como en Río Verde Transchaco, el acuífero se extiende más allá de la planicie de inundación adquiriendo carácter de confinamiento local. En tiempo de estiaje estos acuíferos actuarían como flujo de base de los ríos y riachos del Chaco Deprimido, con sustancial aporte del acuífero confinado/semiconfinados.

Acuíferos confinados/semiconfinados

Agua subterránea, confinada o semiconfinada, se presenta en todo el Chaco Paraguayo, al sur del Paralelo 21 S, en varios niveles a diferentes profundidades, en términos generales por debajo de los 50 m en el oeste, en el límite con Bolivia, y por debajo de los 5 - 3 m en el Chaco Deprimido. Alcanzan espesores máximos de 25 a 45 m. El nivel pizométrico hacia el oeste se encuentra por debajo del nivel freático, y a medida que se desplaza hacia el este esa diferencia se hace paulatinamente menor, alcanzando misma profundidad en el Chaco central y llegando incluso a invertirse en el Chaco Deprimido, ocasionando flujo de los acuíferos confinados a los freáticos.

Litológicamente los acuíferos están constituidos por arena fina, a veces con una participación pequeña de arena mediana hacia el oeste, y están separados por capas de limo, a veces arenoso, otras arcilloso, o también arcilla. Son frecuentes las concreciones de carbonato, tanto en las arenas como en el limo y arcilla. En estos últimos a veces ocurren cristales o lentes de yeso.

Los pozos que captan estos acuíferos presentan una capacidad específica del orden de 1.600 l/h/m en media, de manera que un pozo bien diseñado puede, en algunos casos, suministrar caudales superiores a los 80.000 litros/hora.

CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

En la cuenca del Gran Chaco, la calidad química de las aguas subterráneas es el factor limitante para su utilización doméstica, ganadera y agrícola. La presencia, en la mayor parte del área de aguas con elevados contenidos en sales se debe a que entre los sedimentos que rellenan la cuenca se encuentran sales evaporíticas (principalmente yeso) que por solubilidad dan origen a aguas salobres o saladas. Por otra parte, los períodos de permanencia y los recorridos del agua subterránea a través de los acuíferos del Chaco son muy largos aumentando así las posibilidades de disolución de sales. Es por ello que, en el Chaco Paraguayo, el factor clave no es la cantidad sino la calidad.

De acuerdo a Oosterbaan (1988) la salinidad del agua subterránea de los acuíferos profundos del Chaco Seco aumenta hacia el sudeste, a lo largo de la línea de flujo subterráneo, y disminuye con la profundidad. El sodio es el catión dominante, mientras que la dominación aniónica cambia a lo largo de la línea de flujo (Fig. 3) :

HCO_3^- ---- SO_4^{2-} ---- Cl^- de oeste a este.

Ocurrencia de agua dulce - salada en acuíferos freáticos

En relación a la presencia de agua dulce y salobre/salada en los acuíferos freáticos, se puede dividir el Chaco Paraguayo en 3 grandes zonas (Fig. 4).

Zona 1 - - Ausencia de acuíferos freáticos continuos. Los acuíferos colgados que existen en esta zona presentan agua dulce.

Zona 2 - - Mayormente los acuíferos freáticos presentan agua salada. El agua dulce se presenta en forma de lentes o bolsones, en ambiente de agua salobre, en donde las condiciones de infiltración son favorables. Estos acuíferos con agua dulce son locales y dispersos, sin conexión alguna entre ellas. El volumen de agua dulce disponible es limitado, utilizables generalmente para demandas locales.

Zona 3 - - También los acuíferos freáticos contienen agua salada. En algunos casos, los acuíferos presentan agua dulce en cantidades limitadas, generalmente, "flotando" sobre el agua salada, debido a que la velocidad de circulación horizontal es mayor que la velocidad de difusión de las sales, en época de estiaje se vuelven salada.

Ocurrencia de agua dulce - salada en acuíferos confinados

Adoptando como límite natural de agua dulce a la isolínea de 2.000 mg/l de residuo seco, se puede zonificar el Chaco Paraguayo en relación a la ocurrencia de agua dulce - salada en los acuíferos confinados (modificado de UNESCO / ROSTLAC, 1989), tal como se presenta en la Fig. 5.

Zona I - - La principal característica de esta zona es la ausencia de acuíferos con agua salada ni siquiera salobre. El agua subterránea presenta residuo seco que varía de 200 a 600 mg/l de oeste - este. El anión predominante es el bicarbonato.

Zona II - - La característica más resaltante de esta zona es la presencia de agua subterránea salada sobrepuesto a acuíferos con agua dulce. Los acuíferos con agua salada se presentan en algunos lugares hasta los 50 m y en otras hasta los 150 m de profundidad. Por debajo de ellas se presentan los acuíferos con agua de buena calidad, cuya potencia aún no fué determinada.

El catión dominante es el sodio. En los acuíferos con agua dulce el anión dominante es el sulfato, en cambio en los acuíferos con agua salada es el cloro el anión dominante. El límite establecido a esta zona corresponde a la isolínea de 2.000 mg/l de residuo seco.

Zona III - - Todos los acuíferos confinados/semiconfinados contienen agua salada. Acompañando a la isolínea de 2.000 mg/l de residuo seco se presenta una franja de agua subterránea salobre que gradualmente pasa a salada hacia el este. El agua salobre, en algunos casos, es apta para ganado.

En la región del Chaco Deprimido existe un constante flujo de agua salada de los acuíferos confinados hacia los acuíferos freáticos. Este fenómeno reduce considerablemente las posibilidades de la existencia de agua subterránea de buena calidad en esta región.

PROPUESTA DE ESTRATIFICACION HIDROGEOLOGICA

La distribución de las aguas subterráneas del Chaco Paraguayo corresponden a franjas de rumbo general oeste-este a noroeste-sudeste, es decir, paralelas a la dirección del flujo.

En el área entre Gral. Garay y Ite. Enciso, se distingue verticalmente dos secciones. En la parte superior, hasta unos

110 - 130 m de profundidad, los acuíferos confinados o semiconfinados se caracterizan por un rendimiento muy variable, en general bajo o incluso en algunos lugares prácticamente inexplotable. Los acuíferos más importantes del área se encuentran en la sección inferior, es decir, debajo de los 110 - 130 m (Naciones Unidas, 1978).

El área sur del Chaco Seco, entre Safari Ranch - Pratts Gill y Anita I, verticalmente también presenta dos secciones. La parte superior, hasta los 150 - 170 m de profundidad, corresponde a una franja de acuíferos confinados salobres o saladas. Los acuíferos de la sección inferior son los más importantes en calidad y corresponderían, por la gran similitud en la composición química y perfil litológico de los pozos, a un mismo horizonte hidrogeológico.

Existiría otra franja similar entre Inf. Rivarola - Sta. Rosa y Tte. Ochoa, pero hasta ahora no existen suficientes evidencias al respecto.

También los acuíferos freáticos presentan formas de ocurrencia y características hidrodinámicas bastantes homogéneas entre ellas, a pesar de que difieren en sus características hidroquímicas.

Todo esto evidencia que los acuíferos del Chaco presentan cuestiones de estratificación de aguas subterráneas que, para una mejor comprensión de su distribución, se hace necesario dividirlos hidrogeológicamente, lo cual se puede lograr mediante la creación de unidades hidroestratigráficas.

Por otro lado, en los diversos estudios hidrogeológicos se designan diferentes nombres a los acuíferos del Chaco Paraguayo. Así, en el informe de Naciones Unidas (1978) denomina a los acuíferos de la zona occidental del Chaco como acuíferos del noroeste. En el Mapa Hidrogeológico de Paraguay (Gobierno Nacional/Naciones Unidas, 1986) : Chaco oeste, Chaco centro-sur, Chaco paleo-cauce y Chaco este, designaciones incorrectas, como fué señalado por Oosterbaan (1988), ya que los acuíferos constituyen un solo sistema hidrogeológico que se extiende por el todo el Chaco. En el Mapa Hidrogeológico de América del Sur (UNESCO/ROSTLAC, 1989) se los denomina Chaco Alto y Chaco (parte central y deprimida).

Los varios nombres utilizados para los acuíferos del Chaco, en vez de facilitar su comprensión, crean más confusión. Esto se evitaría dividiéndolo en unidades hidroestratigráficas, con lo cual se logrará la normalización de la descripción y denominación de los acuíferos.

Desarrollo histórico

En 1964, G.B. Maxey indicaba que una categoría de unidades hidroestratigráficas debería ser reconocida, unidades definidas como "cuerpos de rocas con extensión lateral considerable que

formar
ble d
cas cu
ser des
mació
aprovcl
contenit
capas
ne arr
lentame
la fo
Paraguá
agua r
Varga

Er
geolo
Klíment
ción vi
mente
subterr
hidroge
fero, p

Por
mismo e
nal, r
represe
grado

La
grand
misma
saturad
te, si
regiona
relació
garantí
hidrodi
El comp
de uif

acuífer
plano i
ment
pres br
horizon

as
zonte
teri ac
el c r
ries
pernal

emicon-
en-geña
lible
a sec-
aciones

ts-Gill
a arte
e a una
uteros
id y
química
drgeo-

la-Rosa
dcias

ci-ren-
entre
ilicas

te-ntan
ar una
dividir-
l crea

ica se
arayo.
los acui-
n ces-
onri/Nac-
co paleo-
se ala-
n so-
chaco.
RO TLAC,
epri-

chaco.
Esto se
on lo
en mina-

uidades
efinidas
ble que

forman un almacén geológico permitiendo una distinción razonable de sistema hidrogeológico". Sugiere que las unidades litológicas que funcionan como acuíferos o unidades confinantes pueden ser designados por cualquier uno de los términos "acuíferos" (formación geológica que almacena y transmite agua que pueda ser aprovechada económicamente); "acuicludo" (formación geológica que conteniendo agua en su interior no la transmite, llamados también capas confinantes) y "acuitardo" (formación geológica que contiene apreciables cantidades de agua que los transmiten muy lentamente). Términos que deberán ser precedidos por el nombre de la formación geológica correspondiente. De acuerdo a esto, en el Paraguay la arenisca Misiones considerándolo como portadora de agua recibiría: el nombre de Acuífero Misiones, las lutitas Vargas Peña de Acuicludo Vargas Peña y así por delante.

El VSEINGEO (Instituto de Investigación Científica de Hidrogeología y Geología Aplicada a la Ingeniería de la URSS) en Kliméntov & Kónonov (1978), ante las cuestiones de estratificación hidrogeológica y de la necesidad de dividir hidrogeológicamente en el corte y señalar las áreas de difusión de las aguas subterráneas en un mapa, ha desarrollado un esquema de unidades hidrogeológicas taxonómicas: horizonte acuífero, complejo acuífero, piso hidrogeológico y serie impermeable.

Por horizonte acuífero se entiende la serie de rocas de una misma edad o de edades diferentes, saturadas de agua gravitacional, relativamente uniforme en el plano y en el corte, y que representa un todo único en el sentido hidrodinámico y, en cierto grado, hidrogeoquímico.

El complejo acuífero es una subdivisión hidrogeológica más grande que el horizonte. Representa una serie de rocas de una misma edad o de edades diferentes y de distinta composición, saturadas de agua, uniformes en el corte y difundidas regionalmente, limitadas en el techo y el piso por estratos impermeables regionalmente uniformes que casi excluyen o dificultan la relación hidráulica con otros complejos acuíferos vecinos, garantizando así las particularidades determinadas del régimen hidrodinámico e hidrogeoquímico, propias para un complejo dado. El complejo acuífero puede comprender varios horizontes acuíferos de uniformidad diferente y mutuamente relacionados.

Por piso hidrogeológico se entiende el conjunto de complejos acuíferos limitados, sólo en el plano superior o en el techo y el plano inferior, por potentes series de rocas impermeables regionalmente uniformes dentro de los límites del sistema de agua bajo presión. Cada piso hidrogeológico se subdivide en complejos y horizontes acuíferos.

Las formas de acumulación de las aguas subterráneas (horizonte acuífero, complejo acuífero y piso hidrogeológico), caracterizadas más arriba, pueden tener diversas dimensiones tanto en el corte como en el plano. Están separadas unas de otras por series impermeables de distinta potencia, uniformidad y grado de permeabilidad de las rocas.

Ante las cuestiones de distribución regional, en un plano horizontal de las aguas subterráneas, Heath (1982) enfatiza que en algunos grupos de terrenos, semejanzas en hidrogeología son más notables que las diferencias. Señala que la clasificación de los sistemas de aguas subterráneas en regiones hidrogeológicas es uno de los más efectivos herramientas para transmitir conocimientos de un lugar a otro y para mejorar el conocimiento público de la ocurrencia y disponibilidad de las aguas subterráneas. Indica que el concepto de regiones hidrogeológicas ya ha sido mencionado por M.L.Fuller en 1905, en U.S.G.S. Water - Supply Paper 114.

El concepto de regiones hidrogeológicas fué ampliado a través de su división en Provincias Hidrogeológicas. Entre los factores que contribuyen para la definición de una provincia hidrogeológica se destacan la conformación geológica y las características fisiográficas.

El factor geológico es uno de los más importantes, puesto que, las características litológicas, estructurales y tectónicas, controlan las condiciones de ocurrencia, el movimiento y la calidad de las aguas subterráneas. Las características fisiográficas condicionan la infiltración y recarga de los acuíferos, así como la dirección de las aguas subterráneas (Mapa Hidrogeológico de Venezuela, 1986).

Es interesante destacar que los conceptos de regiones y provincias hidrogeológicas y las unidades hidroestratigráficas de Maxey, son ampliamente usados hoy en día en todo trabajo hidrogeológico.

De acuerdo a estos conceptos, el Paraguay está comprendido entre las regiones hidrogeológicas: Plataforma Brasileira y Planicie Chaco - Pampeano y las provincias hidrogeológicas: Pantanal - Chaco y Paraná.

Estratificación hidrogeológica del Chaco Paraguayo

Como se ha señalado arriba, los acuíferos del Chaco se presentan en varios niveles a diferentes profundidades, y en ciertas áreas muestran similitudes hidrodinámicas e hidroquímicas. Ante la necesidad de representar en un corte, designar y describir los acuíferos del Chaco, se propone adoptar la metodología de estratificación hidrogeológica creada por el VSEGINGEO. En el Cuadro I se presenta las denominaciones del piso hidrogeológico y complejos acuíferos propuestos. En relación a los horizontes acuíferos a pesar de que ciertas áreas presentan similitudes (como las áreas de Gral. Garay - Tte. Enciso y Safari Ranch - Anita I), consideramos prematuro, ante la falta de suficientes evidencias, realizar una subdivisión dentro de esta categoría.

Piso hidrogeológico Chaco - - Corresponde a la Formación Chaco de edad Terciario - Cuaternario, integrada por depósitos lacustres, deltaicos y palustres, con participación de material de origen eólico. En la parte basal se presentan grandes espesores de

arc 1
randol
limos
a l: a
esquem
piso h

Co
ex
de
ri
co
ca
ag
ca

Co
de
ab
de
ri
la
ci
ca
te
sa
ta

Co
co
un
na
or
li
de
or
ca
de
so
an
qu
os

-a
aqu' s
metodo
esp: ci
cia a
semico
Ter la
tics/

arcillas y limos grises con concreciones y lentes de yeso, separándolo de las formaciones geológicas más antiguas. Arenas finas, limos arcillosos o arenosos, y en menor grado arcillas suprayacen a la anterior en forma concordante. En la Fig. 6 se presenta un esquema idealizado de la distribución del flujo subterráneo en el piso hidrogeológico Chaco, hasta una profundidad de 400 m.

Complejo acuífero Aluvial -- Acuíferos freáticos, que se extienden por todo el Chaco Deprimido, constituidos por arenas finas que se presentan, principalmente, en la planicies de inundación de los numerosos ríos y riachos que desaguan al río Paraguay. En algunos casos presentan condiciones de confinamiento local. Contienen agua salada, el agua de buena calidad se encuentra en cantidades limitadas "flotando" sobre agua salada, debido a que la velocidad de circulación horizontal es mayor que la velocidad de difusión de las sales.

Complejo acuífero Paleocauce -- Acuíferos freáticos y/o semiconfinados en paleocauces colmatados, meandros y canales abandonados, que se extienden por el Chaco Seco y la Planicie de Inundación del río Pilcomayo, constituidos por arenas finas, bien seleccionadas y redondeadas. A veces, intercalaciones lenticulares de material impermeable crean condiciones de confinamiento local. Mayormente presentan agua salada. El agua de buena calidad se presenta en forma de lentes o bolsones, locales y dispersos, en ambiente de agua salobre, en donde las condiciones de infiltración son favorables.

Complejo acuífero Yrenda -- Acuíferos confinados y/o semiconfinados que se extiende por todo el Chaco, constituyendo un sistema hidrogeológico regional. Compuesta por una alternancia de arenas finas, limos y arcillas. Son frecuentes la presencia de sales evaporíticas (principalmente yeso) en los limos y arcillas, ya sea en formas de concreciones y lentes delgadas. Alcanzan espesores máximos de 25 a 45 m. Hasta la profundidad de 350 m (profundidad de investigación) la calidad de las aguas varían de dulce a salada en la dirección del flujo subterráneo (oeste-este y noroeste-sudeste). El sodio es el catión dominante, mientras que la dominación aniónica cambia a lo largo de la línea de flujo. Los pozos que captan los acuíferos de este complejo presentan caudales específicos del orden 1.600 l/h/m en media.

DISCUSION

La propuesta de estratificación hidrogeológica presentada aquí son, en cierto grado, discutibles, pero creemos que con esta metodología se facilitará la descripción de la distribución espacial de los acuíferos del Chaco. Así, cuando se hace referencia a un determinado complejo acuífero, como a los confinados / semiconfinados profundos, los identificaremos por el nombre de Terciario-Cuaternario Chaco Yrenda (TQcy); a los acuíferos freáticos/semiconfinados del Chaco Seco y de la Planicie de Inunda-

ción del río Pilcomayo por Cuaternario Chaco Paleocauce (Qcp); y a los acuíferos freáticos del Chaco Deprimido por Cuaternario Chaco Aluvial (Qca).

AGRADECIMIENTOS

Este artículo fué preparado como parte del trabajo de Disertación de Mestrado titulado " Características Hidrogeológicas e Hidroquímicas de la Región Noroeste del Chaco Paraguayo " a ser presentado en la Universidad Federal de Pernambuco (UFPE) - Brasil, en tal sentido agradezco las orientaciones y sugerencias del Dr. Albert Mente y el Dr. Waldir Duarte Costa (profesor de la UFPE). Al Proyecto PAR/88/009 (Gobierno Nacional/UNDP) por el soporte adicional. Así mismo, a Martin Mifflin Ph.D., al que considero como el primer crítico de este artículo, agradezco sus orientaciones y envío de material bibliográfico. Finalmente agradezco al Dr. Massimo Groce por la traducción del resumen al inglés.

REFERENCIAS

- ENGELEN, G.B. & JONES, G.P., 1986. Developments in the Analysis of Groundwater Flow Systems, IAHS Publication No.163, Oxford - shire, UK, 356 p.
- GOBIERNO NACIONAL/NACIONES UNIDAS, 1986. Mapa Hidrogeológico de Paraguay, Escala 1:1.000.000, Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado del Chaco / Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Asunción, 106 p.
- HEATH, R.C., 1982. Classification of Ground-Water Systems of the United States, Ground Water, Vol. 20, No. 4 : p. 393 - 401.
- KLIMENTOV, P.P. & KONONOV, V.N., 1978. Metodología de las Investigaciones Hidrogeológicas. Editorial Mir, Moscú, 338 p.
- MAPA HIDROGEOLOGICO DE VENEZUELA, texto Explicativo, 1986. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección de Hidrología, Caracas - Venezuela.
- MAXEY, G.B., 1964. Hydrostratigraphic Units, Journal of Hydrology 2 (1964) 124 - 129.
- NACIONES UNIDAS, 1978. Investigación y Desarrollo de Agua Subterránea en el Chaco - Informe Técnico, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Nueva York, 93 p.
- OOSTERBAAN, A.W.A., 1988. Evaluación Hidroquímica del Agua Subterránea en los Acuíferos Profundos en el Chaco Oeste, Departamento de Agua para el Chaco (CNDRICH-MDN) / Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Filadelfia, 27 p.

PROYECT

Uso

F. y r

del

UNES O,

Esca

Depo

Eucanio

Ciencia

Un ars

agris s

Mapa H

Am ica

Preent

Proyect

) y
ario

o de
lò i-
o a
E) -
ncas
de la
r el
ue
o sus
mente
n al

ly is
ord -

co de
De-a-
ic as

f +he
l.

nv s-

ir s-
blés,

ydro-

Subte-
ic es

gua
er e,
ma de

PROYECTO CHACO -- GOBIERNO NACIONAL/OEA, 1983. Suelos y Aptitud de
Uso de la Tierra del Chaco Paraguayo (autor: Costa de Lemos,
Raymundo), Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado
del Chaco, Asunción, 105 p.

UNESCO/ROSTLAC, 1989. Mapa Hidrogeológico de América del Sur
Escala 1 : 5.000.000 - Texto Explicativo (borrador),
Departamento Nacional de Producción Mineral (DNPM), Brasil.

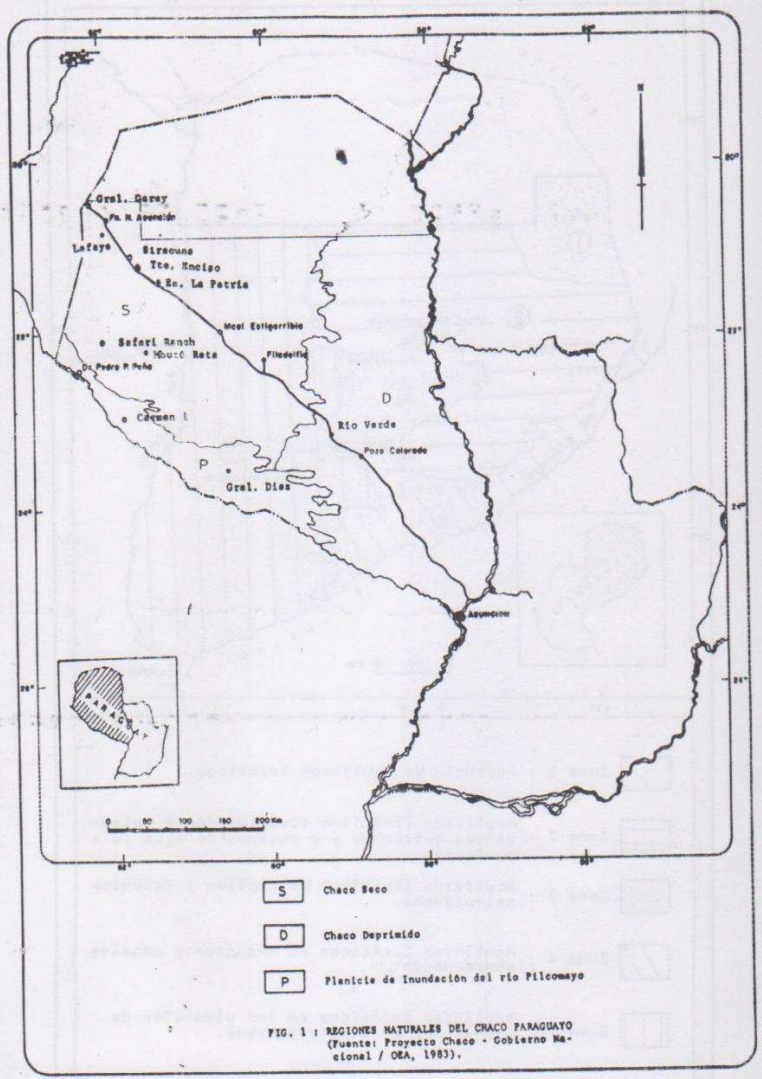
* * * * *

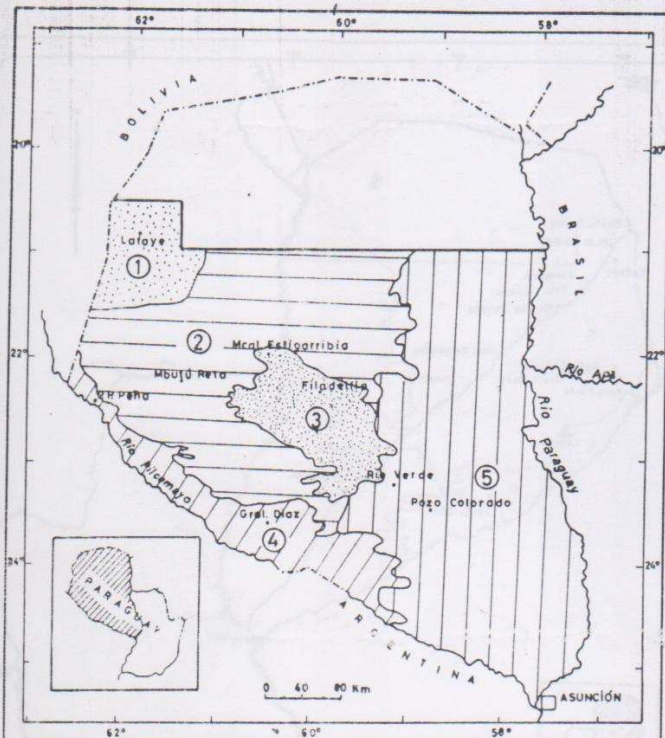
Eugenio Godoy V. obtuvo el título de Licenciado en Ciencias (Geología) en 1963 en el Instituto de
Ciencias Básicas (UNA) y actualmente es candidato a Master en Geociencias (Hidrogeología) por la
Universidad Federal de Pernambuco - Brasil. Desde 1976 trabaja en la investigación y desarrollo de
aguas subterráneas del Chaco Paraguayo. Participó como contraparte nacional en el Proyecto PAR/83/005
Mapa Hidrogeológico del Paraguay, y forma parte del equipo ejecutor del Mapa Hidrogeológico de
América del Sur, esc. 1:5.000.000 (UNESCO/ROSTLAC). Es coautor de artículos técnicos-científicos
presentados en congresos y simposios en el exterior. Se desempeña como Hidrogeólogo Nacional en el
Proyecto PAR/88/009 "Desarrollo de Recursos Hídricos del Chaco Paraguayo" (Gobierno Nacional/ PNUD).

EDAD GEOLOGICA	PISO HIDROGEOLOGICO	COMPLEJOS ACUIFEROS	HORizontES ACUIFEROS	Descripción
CUATERNARIO - TERCARIO	CHACO	Aluvial		Acuíferos freáticos del Chaco Deprimido, constituidos por arenas finas que se presentan principalmente en las planicies de inundación de los numerosos ríos y riachos que desaguan al río Paraguay. En algunos casos, presentan condiciones de confinamiento local. Contienen agua salada, el agua de buena calidad se encuentra en cantidades limitadas "flotando" sobre agua salada, debido a que la velocidad de circulación horizontal es mayor que la velocidad de difusión de las sales.
		Paleocauce		Acuíferos freáticos y/o semiconfinados en paleocauces colmatados, meandros y canales abandonados, que se extienden por el Chaco Seco y la Planicie de Inundación del río Pilcomayo, constituidos por arenas finas, bien seleccionadas y redondeadas. A veces, intercalaciones lenticulares de material impermeable crean condiciones de confinamiento local. Mayormente presentan agua salada. El agua de buena calidad se presenta en forma de lentes o bolsones en ambiente de agua salada. Localmente y dispersos, en donde las condiciones de infiltración son favorables. El espesor varía de 12 a 2 m. Su nivel se encuentra a una profundidad de aproximadamente de 20 m en la parte occidental y de 3 m en la parte oriental. Los caudales específicos de los pozos varían de 300 a 5.000 l/m ³ /m. Su permeabilidad varía de 0,3 a 12 m ² /día y la transmisibilidad de 2 a 170 m ² /día.
		Yrenda		Acuíferos confinados y/o semiconfinados profundos que se extiende por todo el Chaco Paraguayo al sur del paralelo 21 S, en varios niveles a diferentes profundidades, en términos generales por debajo de los 50 m en el oeste, en el límite con Bolivia, y por debajo de los 5 - 3 m en el Chaco Deprimido. Alcanzan espesores máximos de 25 a 45 m. El nivel piezométrico hacia el oeste se encuentra por debajo del nivel freático, y a medida que se desplaza hacia el este esa diferencia se hace paulatinamente menor, alcanzando misma profundidad en el Chaco central y llegando incluso a invertirse en el Chaco Deprimido, ocasionando flujo de los acuíferos confinados a los freáticos. Constituidos por arena fina, 1 a veces con una participación pequeña de arena media hacia el oeste, y están separados por capas de limo, a veces arenoso, otras arcillosas, o también arcilla. Son frecuentes las concreciones de carbonato, tanto en las arenas como en el limo y arcilla. En estos últimos a veces ocurren cristales o lentes de yeso. Hasta la profundidad de 350 m la salinidad del agua subterránea aumenta de oeste a este a lo largo de la línea de flujo subterráneo. El agua con buena calidad se presenta en la parte occidental, en cambio, en la parte central y oriental el agua subterránea es salada. Los pozos que captan estos acuíferos presentan caudales específicos que varían de 200 a 3.700 l/m ³ /m. Su porosidad total máxima es de 40% y la porosidad efectiva está entre 7 y 10%. La transmisibilidad está en el rango de 6,7 a 346 m ² /día.



sobre el río Paraguay en la zona de las cascadas de Itaipu. El agua con una velocidad de 10 m/s en la parte
 superior de las cascadas cae en un ángulo de 45° y al caer en un ángulo de 90° se produce un ruido que
 captan estos audífonos presentan caudales específicos que varían de 200 a 3.000 l/m². Su porosidad
 total máximo es de 40% y la porosidad efectiva está entre 7 y 10%. La transmisibilidad está en el
 rango de 6,7 a 346 m/día.










-  Zona 1 : Ausencia de acuíferos freáticos.
-  Zona 2 : Acuíferos freáticos restringidos a paleocauces estrechos y a cuerpos de agua superficial.
-  Zona 3 : Acuíferos freáticos en amplios y extensos paleocauces.
-  Zona 4 : Acuíferos freáticos en meandros y canales abandonados.
-  Zona 5 : Acuíferos freáticos en las planicies de inundación de ríos y riachos.

FIG. 2 : ESQUEMA DE ZONIFICACION DE OCURRENCIA DE LOS ACUIFEROS FREATICOS DEL CHACO PARAGUAYO.

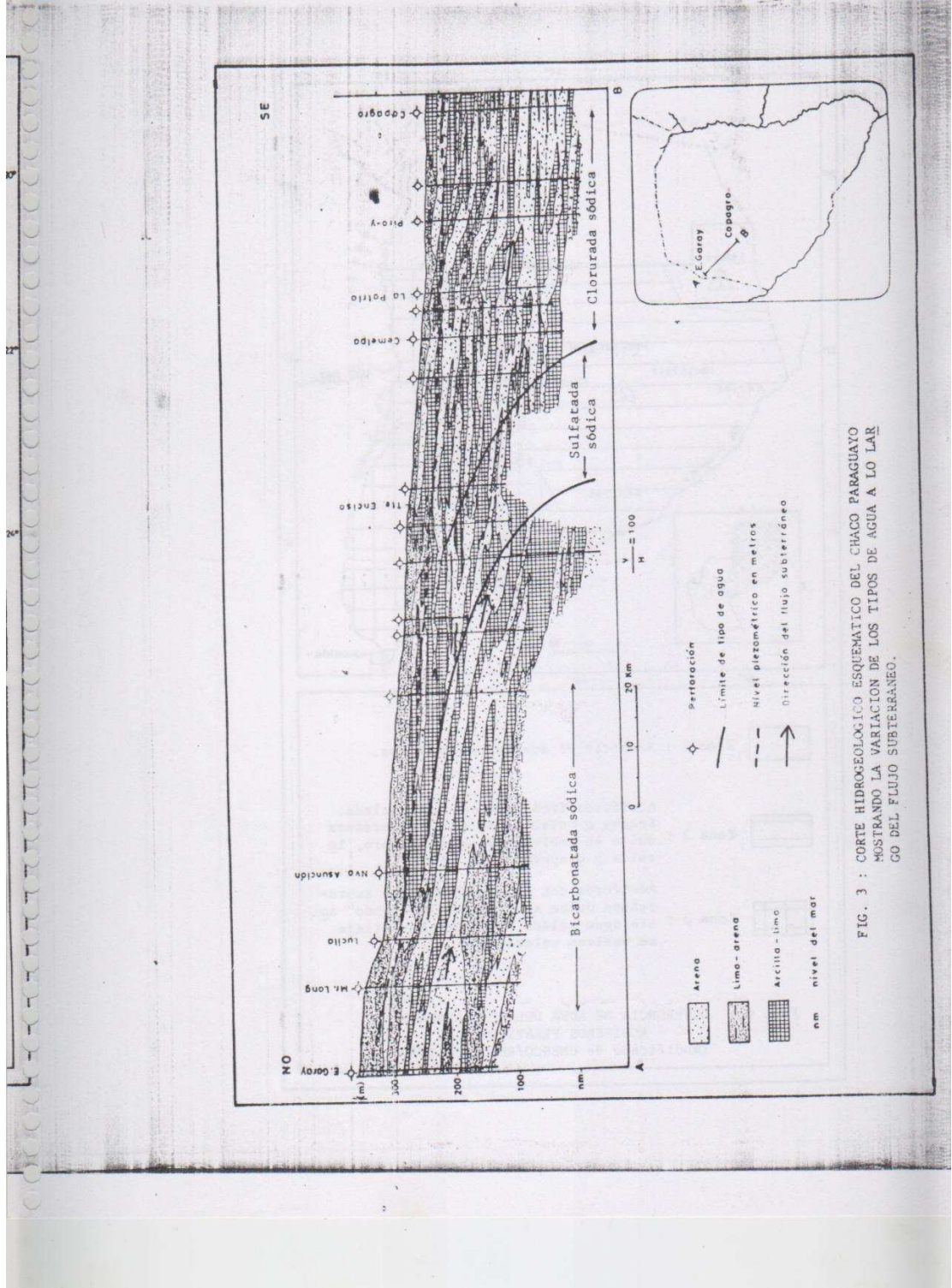
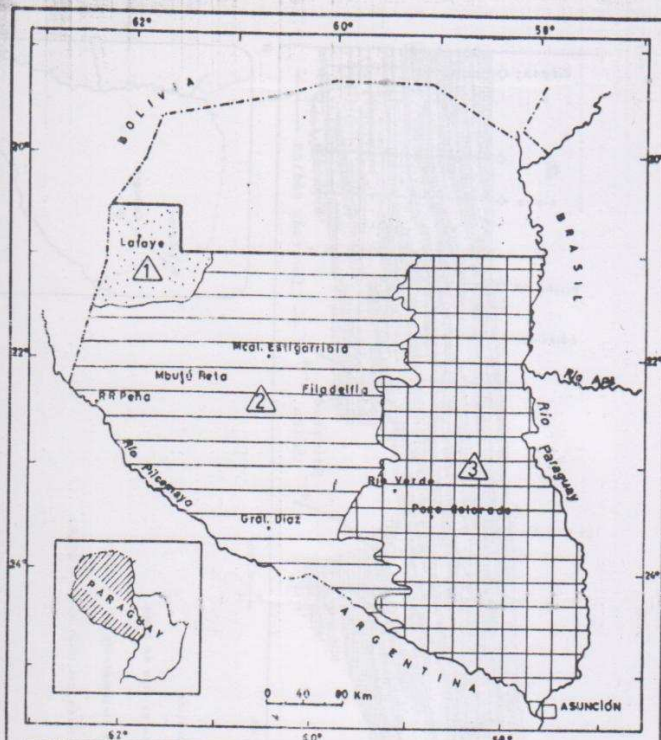




FIG. 3 : CORTE HIDROGEOLOGICO ESQUEMATICO DEL CHACO PARAGUAYO MOSTRANDO LA VARIACION DE LOS TIPOS DE AGUA A LO LARGO DEL FLUJO SUBTERRANEO.



- 
 Zona 1 : Ausencia de acuíferos freáticos.

- 
 Zona 2 : Acuíferos freáticos con agua salada. Lentes o bolsones de agua subterránea dulce en ambiente de agua salobre, locales y dispersos.


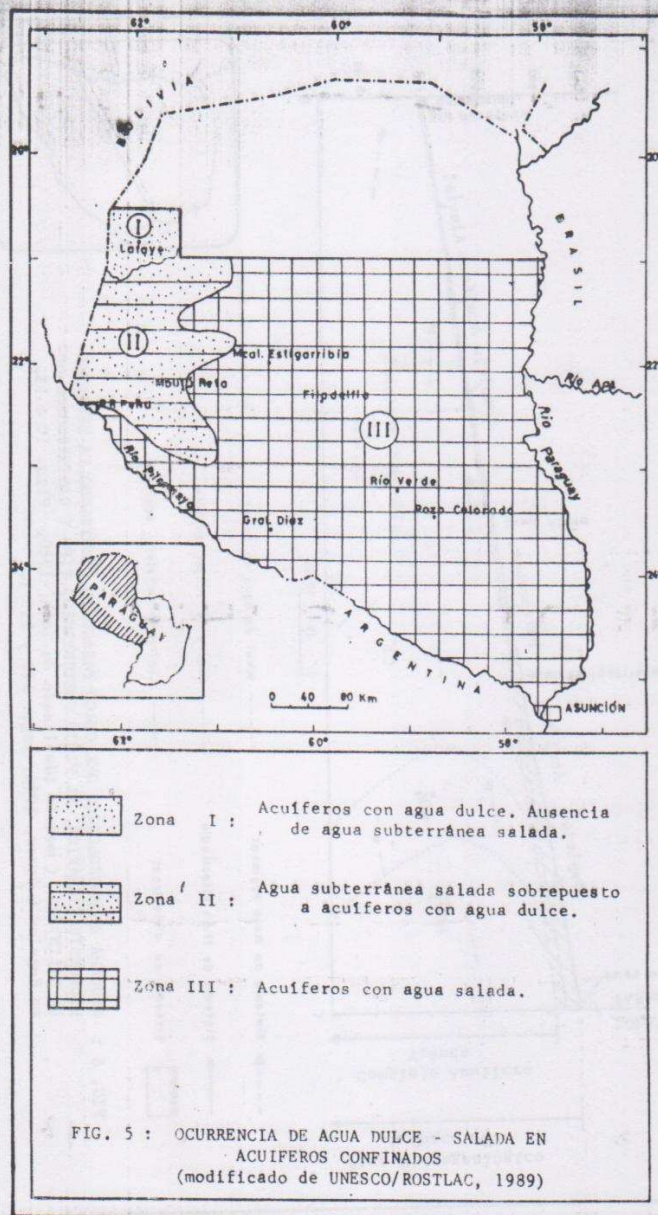
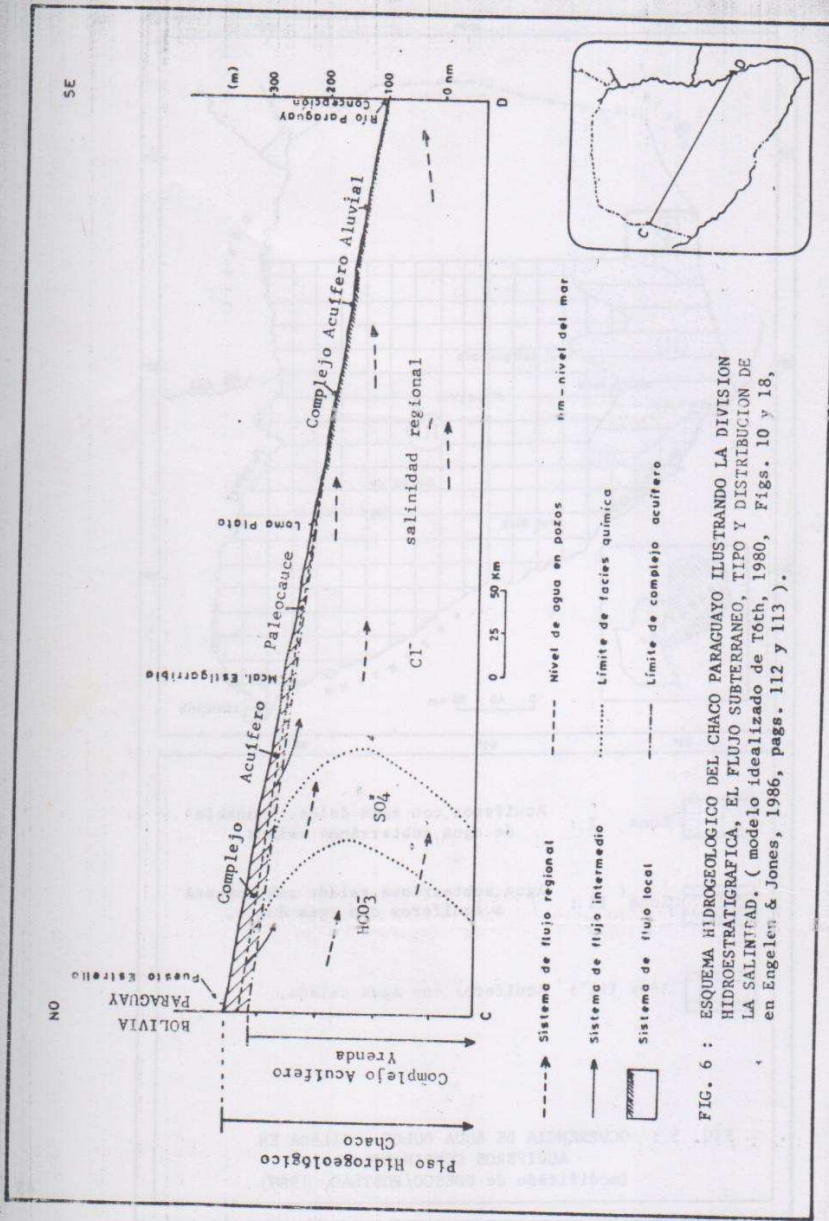
- 
 Zona 3 : Acuíferos con agua salada. Agua subterránea dulce se presenta "flotando" sobre agua salada, en época de estiaje se vuelven salada.

FIG. 4 : OCURRENCIA DE AGUA DULCE - SALADA EN ACUIFEROS FREATICOS (modificado de UNESCO/ROSTLAC, 1989)





MCT

Dar-e

ReouM

it

folta

por

io

De 40

ta

por

moda

ARSTR

by q

gr

acui

gan

contar

vue

el

drill

a

geomorfi

pendi

cuenc

compa

accion

apro

eleva

or

serian

el cu

expue

Morini

super

no co

Departamen

Casil. de

Filad. de

METODOLOGIA DE PERFORACION DE POZOS EN EL CHACO PARAGUAYO

por

Daniel H. Garcia, Santiago Jara G. y Dante L. Irrazabal S. *

RESUMEN - - Por su ubicación geográfica, características geomorfológicas y litológicas, el factor limitante para el desarrollo y colonización del Chaco Paraguayo, son sus recursos hídricos. A la falta de recursos de agua superficial, se suma la gran cantidad de acuíferos con agua salada, siendo por eso una región de constante investigación por parte de organismos internacionales como nacionales.

El Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco cuenta en sus archivos con más de 400 perforaciones realizadas y datos de empresas privadas. En este artículo se exponen las metodologías empleadas para la exploración y explotación de acuíferos en la Región Occidental, y que mejores resultados han dado. Dicha metodología se basa en dos métodos de perforación: barreno mecánico (Auger) y rotativo con circulación directa.

ABSTRACT - - Potential for development and widespread colonization of the Paraguayan Chaco are limited by quality and the difficult exploitation of its water resources; this situation is due to its geographic location and to lithologic and geomorphologic factors. A great number of salty water aquifers and a general poverty of surface water is the rule, and international as well as national organisms are constantly investigating the area.

The Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco can rely on data - base containing information about more than four hundred water boreholes, as well as data coming from private companies. This work explains the two drilling methodologies that have been employed to explore and exploit aquifers in the western region of the Chaco: auger drilling and direct circulation rotary drilling. The main results achieved are presented.

INTRODUCCION

La Región Occidental, abarca una superficie de 246.955 Km², geomorfológicamente se presenta como una vasta planicie de suave pendiente hacia el Este, comprendiendo la parte norte de la gran cuenca sedimentaria del centro de Sudamérica y que Paraguay comparte con Bolivia y Argentina. Se presenta prácticamente sin accidentes topográficos, siendo el Cerro León, con una altura de aproximadamente 700 metros sobre el nivel del mar, el punto más elevado de la región.

Los sedimentos que rellenan esta cuenca, cuyo basamento serían rocas de edad Silúrica, están resumidos en el Cuadro I el cual está basado en informaciones petroleras, interpretadas y expuestas por varios autores. (Banks L. M. 1975; Palmieri - Vera Morinigo 1969, en Naciones Unidas, 1978)

Desde el punto de vista hidrogeológico solamente la sección superior de la columna estratigráfica, constituida por sedimentos no consolidados de la Formación Chaco, sería de interés por la

* Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco
Casilla de Correo 984
Fiatadelfia - Chaco

presencia de acuíferos factibles de ser explotados. Esta Formación está compuesta por una alternancia de arena fina de color pardo claro a amarillento, limo arcilloso o arenoso y arcilla.

El color de los sedimentos pelíticos es pardo claro a rojizo, a veces gris verdoso. Son frecuentes las concreciones de carbonatos, tanto en arenas como en limos y arcillas, donde comúnmente se presentan cristales de yeso ó pequeñas lentes del mismo. Las capas superiores de arena presentan gravilla ferruginosa de color oscuro y diámetro variable.

En algunas zonas como Tte., Ochoa, Pratt Gill, Santa Rosa y Pedro P. Peña, se encuentra una capa de arena gruesa con algo de gravilla entre profundidades de 18 a 30 metros.

La construcción de pozos de agua en el Chaco, está condicionada en gran medida por las características hidrogeológicas, geomorfológicas y litológicas del área, las que conjuntamente con los factores económicos y técnicos determinan el tipo de captación más adecuado.

Las metodologías de exploración y explotación de acuíferos en la Región Occidental, aquí expuestas, son las empleadas actualmente por el Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco.

TIPOS DE ACUIFEROS

Los acuíferos encontrados en los sedimentos no consolidados de la formación Chaco, se pueden clasificar para su estudio en freáticos ó libres y confinados/semiconfinados.

Acuíferos freáticos

La profundidad de estos acuíferos es variable entre 2 y 45 metros, pudiendo presentar confinamiento local. Se presentan por lo general, en los rellenos aluviales de antiguos cauces (paleocauces), ó bien, en cauces más recientes. El agua subterránea de buena calidad se presenta en forma de bolsones ó lentes, en ambientes de agua salada, separados por sus densidades específicas (Fig. 2). Su origen principal es de infiltración directa de las precipitaciones.

Acuíferos confinados / semiconfinados

Estos acuíferos también llamados profundos se encuentran en todo el Chaco paraguayo, siendo el factor limitante su calidad química, por lo que no todos los acuíferos atravesados en una perforación son factibles de ser explotados.

T
recu s
de na
expior
inform
con f
paleoc
volu d
puer
transi
ind a
posibi
reaz
dat
Perfor
P
Augu
monid
L
perrit
con m
acuife
de sa
retira
diámet
filic
techo
cuc ar
por s
genera
hid áu
perfor
agua
elé tr
P
bue a
genera
conuue
del en
* me
o
* i
di
* e
* e
la

PERFORACIONES

Toda actividad de investigación para la exploración de un recurso natural requiere, previo al trabajo de campo, un estudio de gabinete, por tanto, una vez establecida el área a ser explorada, se realiza un inventario hidrogeológico de pozos e informes de documentos existentes, siendo muy importante contar con fotografías aéreas ó satelitarias, para la ubicación de paleocauces y otros detalles geomorfológicos que puedan ser volcados en un mapa base del lugar. Una buena fotointerpretación puede determinar pendientes, caminos de acceso, cursos de agua transitorios, vegetación, paleocauces, etc. que serían indicadores que en definitiva nos conducirían a mayores posibilidades de encontrar agua de buena calidad. Siempre se debe realizar un reconocimiento previo de campo para verificar los datos obtenidos y proceder así a la ejecución de los trabajos.

Perforación en acuíferos freáticos

Para la perforación de éstos acuíferos se emplea una máquina Auger con barrenas helicoidales acoplables, de empuje hidráulico, montada sobre un vehículo doble tracción (Fig. 3).

Las barrenas pueden ser de 4" ó 5" de diámetro. Este método permite un muestreo del cutting cada 1,5 metros, pudiendo medirse con más precisión, lo cual facilita la identificación del acuífero y la calidad del agua "a priori". De dar valores elevados de salinidad se suspende la perforación, caso contrario, se retiran las barras y se continúa con cañería de maniobra de 2" de diámetro, extremo inferior dentado y abierto, con un metro de filtro protegido con malla metálica la cual se baja hasta el techo del acuífero con ayuda de un trípode, procediéndose al cuchareo manual. Este proceso permite que la cañería descienda por su propio peso, hasta llegar a la base del acuífero que generalmente es de arcilla. Al igual que con el barrenado hidráulico, el cuchareo permite controlar la profundidad de perforación, medida por el descenso de la cañería; muestrear el agua con precisión de decímetros y medir su conductividad eléctrica.

Es importante recordar que estos acuíferos presentan agua de buena calidad en contacto con agua salada, por lo que generalmente al ir penetrando el mismo, los valores de conductividad aumentan hasta sobrepasar los límites deseados, debiéndose suspender la perforación. Este método permite :

- * medir "in situ" la calidad del agua del acuífero con equipo portátil de campo cada vez que se cucharee;
- * minimizar los errores de interpretación por ser una medida directa;
- * determinar el espesor del acuífero con agua de buena calidad;
- * medir su nivel estático y construir un perfil litológico de las formaciones atravesadas.

Realizada la exploración y de haber agua de buena calidad se procede al diseño de la obra de captación.

Entubación en acuíferos freáticos -- Dependiendo del factor económico y técnico, la entubación puede realizarse con cañería de hierro galvanizado de 3" ó 4" de diámetro con el extremo dentado la cual se introduce en el pozo mediante cuchareo manual. El filtro va colocado en el extremo inferior y su longitud varía en relación al espesor del acuífero a ser explotado.

Otra alternativa también empleada, consiste en reperfurar con máquina rotativa en 5 7/8" ó 7 7/8" y bajar por gravedad ya sea cañería de hierro galvanizado o bien de PVC de 4" con la base sellada y 1 metro de caño depósito. En este último caso se rellena con cemento para darle mayor peso a la cañería y que descienda sin inconvenientes. Instalada la cañería se coloca el prefiltro de grava seleccionada, en la cantidad calculada por el técnico y se desarrolla el pozo. Por último se realiza el sellado sanitario del mismo con cemento y arena. De existir las condiciones favorables se puede efectuar prueba de bombeo para determinar la capacidad específica, Transmisibilidad T, Permeabilidad K, y si se hubieran construido piezómetros, el coeficiente de almacenamiento S del acuífero explotado. Se debe tomar muestras de agua para efectuar sus análisis correspondiente tanto químico como bacteriológico.

Perforación en acuíferos confinados / semiconfinados

A diferencia de los acuíferos freáticos, éstos no presentan en superficie indicadores, no obstante se debe realizar una recopilación de datos existentes, ver las posibilidades de acceso, fuentes de agua para cubrir las demandas de la perforación, etc. Se debe realizar una recorrida de campo.

Para la ejecución de los trabajos el Dpto. Agua emplea una máquina Davey M8 MA, rotativa con capacidad perforante de 450 metros, equipada con bomba de inyección duplex Gardner Denver y compresor Davey. Toda la unidad montada sobre un camión Ford 9000 diesel, equipado con 3 gatos hidráulicos, (Fig. 4).

Seleccionado el lugar de perforación, se instala la máquina, excavándose 2 piletas de decantación y 1 de succión con capacidad de 3,5 a 4 m³ cada una. Se instala en superficie un reservorio para proveer de agua a la perforación en caso de ser necesario. Terminados estos trabajos se prepara el fluido de perforación, que generalmente es a base de bentonita, empleándose en algunos casos aditivo biodegradable Revert de la Johnson.

El fluido de inyección además de remover del pozo los fragmentos de material atravesados, también refrigera el trépano, previene desmoronamientos por presiones hidrostáticas y lubrica la columna de perforación.

Perforación de investigación -- Primero se realiza una

perforac
lugar,
diám. ro
en la t
cada m
se p oc
vertical
Rayos G

cor
estra ig
corre'ac
ciones,
confe ct

bet
atrav sa
se real
(salid
condi o
mismo p
cauda
manio a
acuífero
agua co
permi
acuífero
buena ca

Perforac
media se
depen' ei
respecti

1
como los
de acuí
formac ón
excesiva
pozos t
inadec ac
descenso
propor ic
mucho ma
los costo
que de e
el fi'tr
meterial
factor qu

U, t

ad se
factor
afuria
xtemo
anual.
varia

perforación de exploración hasta 200 ó 350 metros dependiendo del lugar, con trépano cola de pez (aleta) de 5 7/8" ó 7 7/8" de diámetro. Al ir perforando se debe ir tomando muestras de cutting en la boca del pozo, como así también el tiempo de penetración cada 1 metro. Finalizada la exploración se retiran las barras y se procede a realizar los registros del pozo mediante sonda vertical (Resistividad, Potencial Espontáneo y en algunos casos Rayos Gamma), ver Fig. 5.

rforar
ad ya
a base
o se
y que
ca el
por el
elado
condi-
de ar-
ne pi-
ciente
tomar
tinto

Con los datos obtenidos se confecciona la columna estratigráfica preliminar y el gráfico de registro de avance, que correlacionados con las curvas de resistividad en dos configuraciones, la curva de potencial espontáneo y rayos gamma, permite confeccionar el perfil definitivo del pozo (Fig. 6).

sercan
ona
de la

Determinada las profundidades y espesores de los acuíferos atravesados en la perforación, mediante los registros eléctricos se realiza una evaluación preliminar de su calidad química (salinidad). Una vez individualizado el acuífero que reúne las condiciones para su explotabilidad, se realiza un ensayo del mismo, para determinar la calidad química definitiva y estimar su caudal aproximado. En éste procedimiento se bajan cañerías de maniobra de 4" de diámetro con tramos agujereados frente al acuífero a ser ensayado y se bombea hasta obtener una muestra de agua con una conductividad eléctrica constante. Este método permite si fuere necesario realizar varios ensayos en diferentes acuíferos. Se recuperan las cañerías y si el agua resultó de buena calidad, se realiza el entubado del pozo.

una
150
ver y
1000

Perforación de explotación - - Se realiza el ensanche del pozo mediante reperforación en diámetro en 10" ó 12" de diámetro, dependiendo si se va a entubar en 4" ó 6" de diámetro respectivamente.

uma,
iclad
verio
amo.
con,
gunos

Al terminarse una perforación en sedimentos no consolidados como los de la Formación Chaco, hace falta colocar un dispositivo de admisión del flujo, que retenga los materiales finos de la formación, permitiendo que el agua ingrese al pozo, sin pérdida excesiva de carga durante el bombeo. Desgraciadamente muchos pozos tienen una baja eficiencia debido a su construcción inadecuada. No rinden la cantidad de agua necesaria a causa de un descenso de nivel excesivo, por las pérdidas de entrada. Otros proporcionan el agua necesaria pero con un descenso de nivel mucho mayor del que debería ser, con el consiguiente aumento de los costos de bombeo." No es difícil montar en el pozo un sistema que de el máximo caudal de agua, la dificultad radica en escoger el filtro que de el máximo caudal de agua, libre de arena y material fino durante un largo período de tiempo y que no sea factor que contribuya al mal funcionamiento del pozo" (Horte, 1968)

pno,
boca

CARACTERISTICAS DEL FILTRÓ

na

Un buen filtro debe estar diseñado y construido, cuidando de

mantener:

- * Aberturas de filtro diseñadas de tal manera que evite la obturación por arena y grava, esto es, aberturas de ranura en forma de "V", más estrecha por la cara exterior de la rejilla y más ancha hacia dentro (Fig. 7).
- * Espaciado denso de las aberturas para proporcionar la cantidad máxima de área abierta sin sacrificar la resistencia necesaria.
- * Distribución uniforme de las ranuras para proporcionar un flujo fácil y no tortuoso.
- * Construcción en un solo metal, resistente a la acción química del agua subterránea, o a los ácidos empleados para desalojar la incrustación.
- * Resistencia al colapso y a la compresión para oponerse a las fuerzas que se ejercen sobre el filtro.

Por el pequeño diámetro de las partículas de la Formación Chaco, el Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco emplea en sus perforaciones filtros de ranura continua de 1 mm de abertura ó Supertell, ambos de la Johnson, siempre con un prefiltro de grava seleccionada, previo análisis granulométrico de los materiales del acuífero.

Generalmente para acuíferos de espesor considerable y homogéneo, es recomendable que la longitud del filtro, para acuíferos freáticos, sea entre 1/3 y 1/2 del espesor del acuífero, colocándose dicho filtro en la base del mismo con centralizador en los extremos. En los acuíferos confinados y semiconfinados, el filtro debe medir entre 70 y 80 % del espesor de dicho acuífero.

ENTUBACION

En la entubación se usa caño ciego de hierro galvanizado, no dando resultados favorables el PVC en pozos profundos por su baja resistencia al colapso y a la presión confinante. Entubado el pozo se procede a su lavado mediante inyección de agua por dentro de las cañerías, para alivianar la inyección y realizar el engravado del mismo, consistente en colocar grava seleccionada entre la parte exterior del filtro y las paredes del pozo, el centralizador permite que el filtro quede en buena posición y verticalidad.

Completado el engravado, se realiza el desarrollo, que puede ser por varios métodos, siendo quizá el más efectivo, con pistoneo, cuchareo y posterior bombeo con aire comprimido. Para eliminar todo el material fino se recomienda un desarrollo de 72 horas como mínimo.

Ocurren casos en que se debe aislar con cemento acuíferos que pueden contaminar al que va a ser explotado.

Se realiza el sellado sanitario del pozo con cemento, quedando en condiciones de ser explotado. Si fuera necesario se puede realizar una prueba de bombeo para determinar su capacidad específica (m/h/m) y en algunos casos se realiza test de bombeo para determinar los parámetros hidráulicos del acuífero (T y P) y si existen pozos de observación ó se han construido, se puede determinar el coeficiente de almacenamiento.

Finalizado el trabajo se confecciona un informe completo del pozo, que formará parte del archivo. En el caso del Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco tiene sus archivos de pozos en la ciudad de Filadelfia, base de operaciones.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos la colaboración del Dr. Massimo Groce por la traducción del resumen al inglés.

REFERENCIAS

HORTE SANTOS, FERNANDO, 1968. Desarrollo de pozos. 1er Seminario de Técnicas Modernas para la construcción de pozos. Ponencias. Servicio Geológico de Obras Públicas, Instituto Nacional de Colonización, Centro de Estudios. Investigación y Aplicaciones del Agua. Barcelona. España -211 -244 págs

NACIONES UNIDAS, 1978. Investigaciones y Desarrollo del Agua Subterránea en el Chaco. Informe Técnico. N.Y. 93 págs.

ARCHIVO DE DATOS HIDROGEOLOGICOS, 1989. Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco. (CNDRICH - MDN). Filadelfia.

* * * * *

Daniel H. García Ségredo se desempeña como geólogo del Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco (CNDRICH - MDN). Participó de 4 cursos de post grado en el Desarrollo de Aguas Subterráneas, auspiciado por la Facultad de Ingeniería - UNA y el Rotary Club Internacional. Obtuvo el título de Lic. Geólogo en el Instituto de Ciencias Básicas - UNA.

Santiago Jara G. se desempeña como geólogo en el Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco (CNDRICH - MDN). Participó del Proyecto PAR/83/005 Mapa Hidrogeológico del Paraguay (Gobierno Nacional / PNUD). Obtuvo el título de Lic. Geólogo en el Instituto de Ciencias Básicas - UNA.

Dante L. Irrazabal se desempeña como ayudante hidrogeólogo desde el año 1972 en el Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco. Participó de varios cursos y seminarios de especialización en el exterior.

CUADRO I

CUADRO ESTRATIGRAFICO DEL CHACO

EDAD	FORMACIONES	FACIES	LITOLOGIA
Cuaternario Terciario	Chaco	Continental	Arena fina a mediana; limos y arcilla pardo claro a rojizo y verde grisáceo a azulado.
Terciario	Pelecópodos (Chaco Inf.?)	Continental	Arcilla arenosa, verde a verde azulado y pardo rojizo con intercalaciones de caliza y arena gruesa.
Cretácico Superior	Petaca	Continental	Areniscas, conglomerados, Lutitas, areniscas, calizas y evaporitas. Areniscas y conglomerados gris a blanquecino; interc. de lutitas oscuras.
	Fn. Grupo Salta	Cont., litoral y marino.	
	EscarPMENT	Continental	
Carbonífero	Tarija	Continental	Limolitas gris verdosas con lentes de arena gris; ambos diamicticos.
	Tupambí	Continental	Areniscas, conglomerados y limolitas pardo oscuras a gris verdosas.
Devónico	Iquirí	Continental	Areniscas y lutitas arenosas.
	Los Monos	Marino	Lutitas micáceas, laminares, gris oscuras a negras; en la base areniscas cuarcíticas.
Silúrico			Cuarcitas micáceas.

Fuente: Naciones Unidas. 1978.

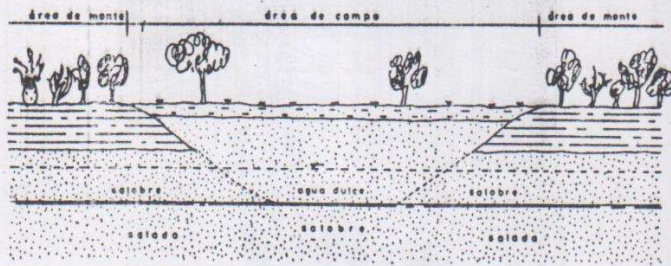


Fig. 2 Ocurrencia de agua dulce en paleocauces.

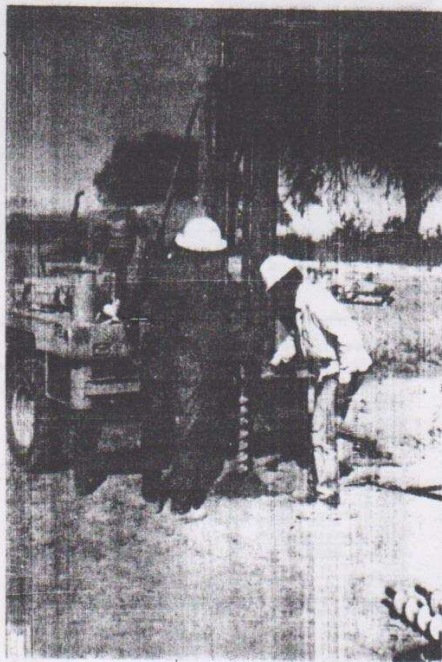


Fig. 3 Máquina Auger perforando.

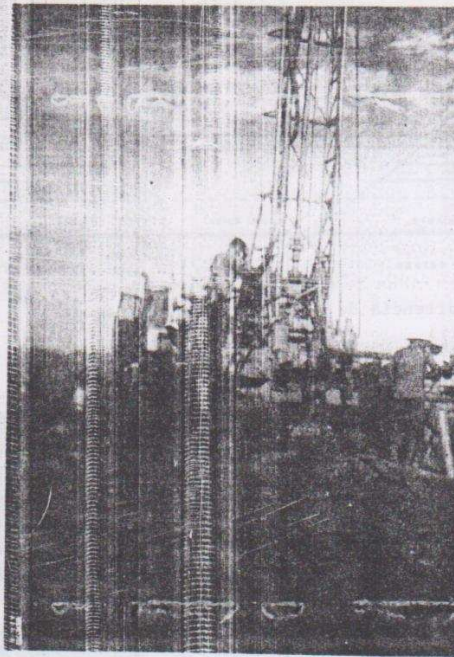


Fig. 4 Máquina Rotativa perforando..

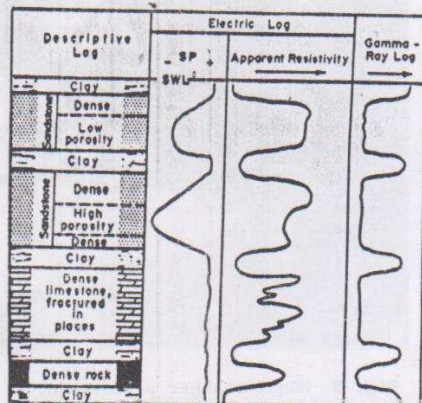


Fig.5 Registro tipo de un pozo.



Fig 6

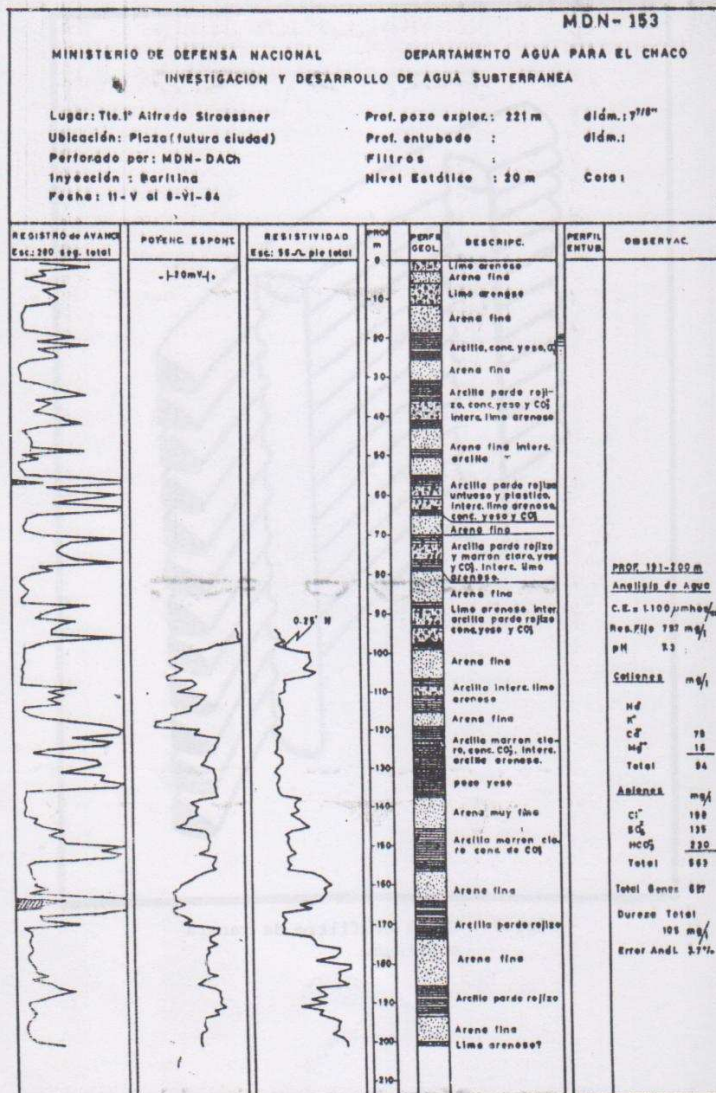


Fig. 6 Registro definitivo de un pozo.

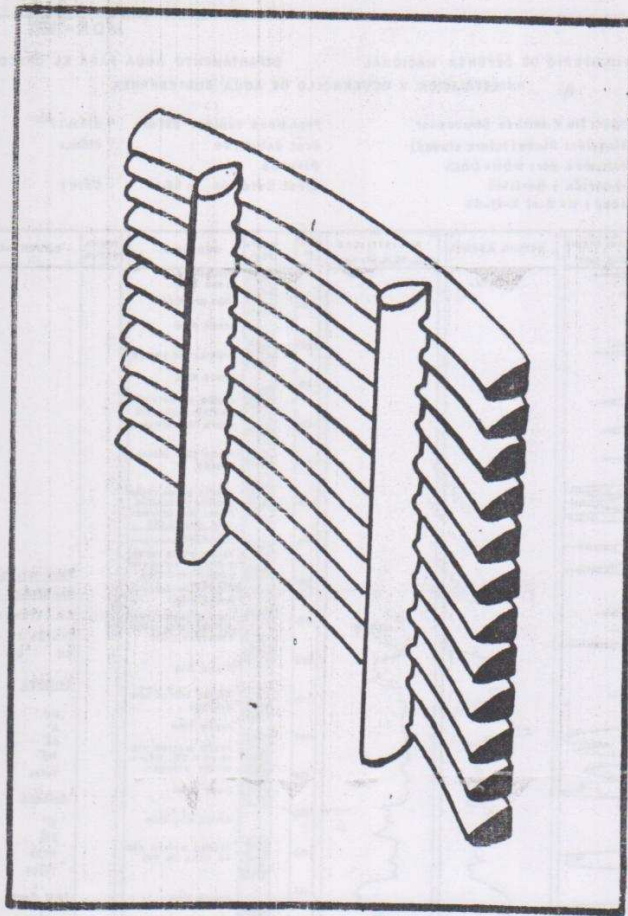


Fig. 7 Corte de filtro de ranura
continua.

CA
R
C
s
l
s
l
AB
P
th
pr
E
fi
jo
árido
Parag
no
tral
veget.
E:
tol
cos y
prorur
agu s
gran
Er
las ag
ganade
par
posibi
Or
* Depa. vame
Cas: a t
Filadelfi

CALIDAD QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DEL CHACO PARAGUAYO
PARA CONSUMO HUMANO, AGRICOLA Y GANADERO

por

Sergio Echeverria, Eugenio Godoy V. y Miguel Orrego *

RESUMEN -- La presencia, en la mayor parte del Chaco Paraguayo, de aguas subterráneas con elevados contenidos en sales limitan en gran manera su utilización. Sin embargo, existen áreas con aguas subterráneas aptas para diversos usos dependiendo de los propósitos y de las condiciones locales bajo las cuales ella será aprovechada.

El grado actual de conocimiento permite establecer normas de calidad química de las aguas subterráneas del Chaco Paraguayo para consumo humano y ganadero, y tener una evaluación preliminar de las posibilidades de su utilización para riego.

ABSTRACT -- A high content of salts greatly limits the use of groundwater in the Paraguayan Chaco Plain. However, local areas exist in which groundwater is suitable for different uses, depending on the local conditions and need.

Chemical quality of groundwater for human and animal consumption can be established by present means. A preliminary quality evaluation for its use in agriculture is also possible.

-INTRODUCCION-

El Chaco Paraguayo se caracteriza por presentar variaciones fisiográficas significativas. El clima varía de subhúmedo a semi-árido y árido. La precipitación anual de 1.400 mm sobre el río Paraguay disminuye gradualmente a 500 mm cerca del límite boliviano. Los suelos son franco limosos y arcillosos en la parte central y este a franco arenosos y arena fina en la parte oeste. La vegetación varía de herbáceas a arbóreas de este a oeste.

Estudios realizados al sur del Paralelo 21 S indican que en toda el área existen aguas subterráneas en acuíferos freáticos y confinados/semiconfinados, en varios niveles a diferentes profundidades, pero la presencia, en más del 70 % del área, de aguas subterráneas con elevados contenidos en sales limitan en gran manera su utilización doméstica, agrícola y ganadera.

En este trabajo se presenta las normas de calidad química de las aguas subterráneas del Chaco Paraguayo para consumo humano y ganadero, adoptadas por el Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco (CNDRICH - MDN) y una evaluación preliminar de las posibilidades de su utilización para riego

APTITUD DE LAS AGUAS PARA CONSUMO HUMANO

Organismos públicos en muchos países han establecido límites

* Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco (CNDRICH-MDN)
Casilla de Correo 984
Filadelfia - Chaco

de ciertos constituyentes en agua para bebida. Existen tremendas variaciones en esos límites, y un acuerdo universal entre ellos es raro. Según Vargas (1982), la existencia de diversas "normas de calidad" provenientes de organismos nacionales o internacionales de reconocida experiencia en el tema llevan a la siguiente conclusión: los límites establecidos para los parámetros del análisis químico tienen bases conceptuales distintas siendo en unos casos objetiva y en otros subjetiva o cultural.

El límite objetivo se presenta cuando con estudios científicos ciertos y comprobables se determina la toxicidad de un elemento para la salud humana. En este tipo de parámetros no existen grandes desacuerdos.

En cambio, existen límites basados en criterios subjetivos o culturales, sin base científica demostrado y muy por el contrario con gran cantidad de información de la realidad que contradice la norma.

Logan (1965), establece que la disponibilidad de un agua dependen de los propósitos y de las condiciones de su uso. Simplemente no es posible preparar especificaciones que puedan tener una aplicación universal. Existe solamente una simple regla fundamental:

"LA CONVENIENCIA DE UNA DETERMINADA AGUA ES SIEMPRE DEPENDIENTE DE LAS CONDICIONES LOCALES BAJO LAS CUALES ELLA SERA USADA".

Norma de calidad química de las aguas subterráneas del Chaco Paraguayo para consumo humano

Como el Chaco Paraguayo presenta áreas semiárida y árida, para ocuparlo se deberá aceptar las restricciones de la misma y tratar de aprovechar todos los recursos hídricos que pueden prestar utilidad al hombre. Ante la ausencia de cursos de aguas superficiales perennes, el agua subterránea adquiere gran importancia por ser el casi único recurso disponible.

Ante las numerosas clasificaciones del agua en cuanto a su potabilidad, adoptaremos algunas de ellas como criterio para la clasificación de las aguas del Chaco, como aquellas definidas por H. Schoeller, el Programa III - Estudio Hidrogeológico Pico del Chaco (Vargas, 1982) y California, 1972 (Catalán, 1981).

Utilizaremos los siguientes parámetros: residuo seco, cloruros, sulfatos, sodio, todos en miligramos por litro de agua (mg/l); Mg/12 + Ca/20 en miliequivalentes por litro de agua (meql); y conductividad eléctrica en micromhos/cm. Dentro de los límites de calidad química establecido por el Departamento de Agua para el Chaco distinguiremos tres tipos de potabilidad: Valor aconsejable, valor aceptable y límite tolerable para corto plazo, tal como se presenta en el Cuadro I.

En relación al residuo seco, Catalán (1981), señala que hoy en día se ha comprobado que el hombre puede consumir agua que contenga hasta 2.500 mg/l sin quebranto para su salud. Por encima de esta dosis no puede tolerarse para un uso continuo, pudiendo hacerse esporádicamente si su contenido salino no sobrepasa los 5.000 mg/l. El valor aconsejable y aceptable adoptado es de 1.000 y 2.000 mg/l respectivamente y el valor límite tolerable para corto plazo es de 2.800 mg/l.

Con respecto a la cantidad de cloruros en el agua destinada a la bebida, un agua que contiene unos 400 mg/l de cloruro sódico no tiene gusto salino, manifestándose éste a partir de los 500 mg/l, pudiendo soportar el organismo humano hasta 2.500 mg/l de esta sal. Se adoptó como valor aconsejable y aceptable 250 y 500 mg/l de cloruros respectivamente y 750 mg/l como valor límite tolerable para corto plazo.

La concentración de ión sulfato en las aguas de bebida ha sido motivo de atención debido a su acción catártica, habiéndose encontrado que las aguas que contienen menos de 600 mg/l son buenas, mostrando efecto laxante las aguas que contienen más de 750 mg/l, aunque existen una gran variedad de opiniones y resultados, según los autores, por lo que es difícil establecer un nivel máximo para las aguas de bebida. Así por ejemplo, agua con una concentración de sulfato de 4.400 mg/l es consumido en una área de Somalia, unas 18 veces más alto que los límites máximos propuestos por muchas autoridades (Logan, 1965). Adoptamos como valor aconsejable y aceptable 250 y 500 mg/l respectivamente y como valor límite tolerable para corto plazo 700 mg/l de sulfato.

En relación al sodio se ha encontrado correlaciones positivas entre la concentración de este ión en el agua y varias enfermedades, entre ellas las que se manifiestan por un fallo del corazón, hipertensión, enfermedades renales, cirrosis hepática, toxemias del embarazo, enfermedad de Menier y la hipernatremia en los niños. En todas estas enfermedades es esencial controlar la dieta de sodio. Se adoptó como valor aconsejable y tolerable 115 y 230 mg/l respectivamente y como valor límite tolerable para corto plazo 460 mg/l de sodio.

Desde el punto de vista fisiológico, el magnesio, con el calcio, sodio y potasio juegan un papel fundamental en la conducción eléctrica de los impulsos cardiacos y en la contractilidad de las células cardiacas. Se ha encontrado una incidencia alta, en enfermedades de coronaria del corazón y síndromes de muertes de niños por shock de histamina, en zonas donde la concentración de magnesio en agua era menor de 15 mg/l, y poca incidencia en áreas que contenían 35 mg/l o más de éste ión. Aunque parece que el calcio no es importante desde el punto de vista fisiológico, juega un papel muy importante como protector, impidiendo la adsorción por el intestino de iones tóxicos. Se adoptó como valor aconsejable y tolerable 10 y 20 meq/l respectivamente y como valor límite tolerable para corto plazo 40 meq/l de la relación Mg/12 + Ca/20.

Existe estrecha relación entre la conductividad eléctrica y el residuo seco de las aguas subterráneas del Chaco. Como presentan correlaciones altas ($R=0.99$) se puede usar las siguientes fórmulas para calcular ambas variables cuando uno de ellos es desconocido (Oosterbaan, 1988) :

$$\begin{aligned} \text{Residuo seco} \cdot \text{RS} &= (0.68 \times \text{CE}) + 147.9 \\ \text{Conduct. eléct.} \cdot \text{CE} &= (1.43 \times \text{RS}) - 100.2 \end{aligned}$$

RS - Residuo seco en miligramos/litro de agua evaporada a 105 C
CE - Conductividad eléctrica en micromhos/centímetro a 25 C

De acuerdo a la fórmula, el valor aconsejable y tolerable es 1.330 y 2.760 micromhos/cm respectivamente y el valor límite tolerable para corto plazo es 3.900 micromhos/cm.

La Fig. 1 muestra la zonificación del Chaco Paraguayo de acuerdo a la aptitud de las aguas, en relación al residuo seco, de los acuíferos confinados / semiconfinados profundos para consumo humano.

APTITUD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS PARA RIEGO

Por la calidad del agua subterránea y por el gran volumen almacenado, únicamente los acuíferos confinados/semiconfinados de la parte noroeste del Chaco podrían ser utilizados para la práctica intensiva de riego. Los suelos son franco arenosos y arena franca fina, mayor de 1% de materia orgánica, pH de 6.5 a 7.0 y libres de contenido de sales.

Para tener una evaluación preliminar de las posibilidades de utilización de aguas subterráneas para riego, se ha adoptado la clasificación seguida por el USSLS (United States Salinity Laboratory Staff) que tienen en cuenta en su clasificación de aguas para riego las siguientes características :

- Concentración total de sales solubles.
- Concentración relativa del sodio respecto al calcio y magnesio.
- Concentración de boro o de otros elementos tóxicos.
- Concentración de bicarbonato en relación con la suma de calcio y magnesio.

Para la concentración total de sales solubles, utilizan para su expresión el valor de la conductividad en micromhos/cm y para la concentración relativa de sodio frente al calcio y magnesio utilizan el denominado índice SAR (relación de absorción de sodio SAR sigla en inglés). La tercera característica no fue determinada. Por último, la cuarta característica a considerar es el carbonato sódico residual.

De acuerdo a la clasificación del USSLS, se ha podido zonificar los acuíferos confinados y semiconfinados del Chaco en rela-

c. y
repen-
siones

05

01 es
te to-

yo de
saco,
para

01 men
dos de
p.ác-
e ana
7.0 y

des de
de la
l. bo-
aguas

de

in para
y para
agnesio
e odio
errina-
el car-

zonifi-
ala-

ción a su aptitud para riego (Fig. 2). La descripción de las características físicas de las zonas es transcripción textual del informe de Raymundo Costa de Lemos (Gobierno Nacional/OEA, 1983).

Zona A - - Predominio de aguas subterráneas con salinidad media y bajo contenido en sodio (C_2S_1). El carbonato sódico residual es predominantemente menor que 1,25 miliequivalentes por litro (meq/l), siendo por tanto el agua aceptable. Dominancia de suelos de granulometría arenosa (regosoles eútricos), profundos, bien a algo excesivamente drenados. La textura es arena con baja capacidad de retención de agua. Las tierras son de aptitud restringida para utilización con forrajes naturales y explotación forestal. El fuerte déficit de humedad, el relieve ondulado, los suelos arenosos sueltos y los fuertes vientos que soplan durante 9 meses al año, hacen con que la erosión eólica sea una limitación muy importante para el desarrollo de esta zona.

Zona B - - Dominancia de agua subterránea altamente salina y bajo contenido en sodio (C_3S_1). El carbonato sódico residual y aptitud de las tierras son similares a la Zona A.

Zona C - - El agua subterránea es altamente salina y contenido medio en sodio (C_3S_2). El carbonato sódico residual es mayor que 1,25 meq/l, siendo por tanto su uso dudoso. Los suelos son predominantemente xerosoles lúvicos y regosoles eútricos, muy profundos, algo excesivamente y bien drenados. Presentan horizonte argílico con saturación de bases altas. Aptitud de la tierra moderada para la explotación forestal, restringida para cultivos forrajeros y moderada para cultivos de ciclo corto.

Zona D - - Predominio de aguas subterráneas muy altamente salina y contenido medio en sodio (C_4S_2). El carbonato sódico residual es negativo, el agua es inapta para riego. Las características físicas y aptitud de la tierra son similares a la Zona C. Cumple resaltar que en esta zona es necesario hacer estudios de los cauces que constituyen la paleored y valles incipientes, para represamiento, conservación y utilización de aguas superficiales.

Zona E - - Los acuíferos presentan agua muy altamente salina y contenido muy alto en sodio. El carbonato sódico residual es negativo, agua inapta. La conductividad eléctrica de las aguas subterráneas son superiores a 10.000 micromhos/cm. Los suelos presentan predominio de regosoles eútricos y xerosoles lúvicos. En cuanto a la aptitud de las tierras, los regosoles presentan aptitud buena para cultivos de ciclo corto y los xerosoles aptitud moderada para cultivos forrajeros.

APTITUD DE LAS AGUAS PARA CONSUMO GANADERO

Logan (1965), señala que los criterios químicos de aguas para el ganado están influenciados por las especies y variedad de animales, tipos de forrajes, clima, y particularmente por las condiciones de adaptación de los animales a una concentración

dada. Este último punto no ha sido investigado en detalle, y como consecuencia de ello, las autoridades no llegaron a un acuerdo sobre "límites aceptables".

En el oeste de los Estados Unidos, algunas clases de ganados parecen que pueden consumir agua que contienen arriba de 5.000 mg/l de residuo seco sin mayores inconvenientes, aún cuando se ha reportado tolerancias en el rango de 3.000 a 15.000 mg/l. Ocasionalmente salinidades mucho más altas pueden ser toleradas, particularmente cuando el ganado se encuentra sediento. Camellos en Turquía y caballos en Haití han sido observados tomando agua de mar no diluida y ganados en el nordeste del Brasil han sido reportados tomando agua de pozo con una concentración de 42.000 mg / l de sales.

Norma de calidad química de las aguas subterráneas del Chaco Paraguayo para consumo ganadero

Existen áreas del Chaco Paraguayo que presentan aguas subterráneas aptas para ganado, constituyendo en algunas zonas el único recurso. En otras pueden mezclarse con el agua de los tajamares, en proporciones adecuadas en cada caso, evitándose de esta manera la reacción del organismo frente a un cambio brusco en la calidad del suministro, como generalmente ocurre cuando al agotarse los tajamares se pasa a utilizar agua subterránea salobre.

Para tener una orientación sobre los límites de calidad química de las aguas subterráneas del Chaco, permisibles para ganado adoptaremos los valores utilizados por el Departamento de Agricultura de Australia Occidental (Hem, 1962) y la Norma de Calidad de Aguas para el Ganado del Programa III - Estudio Hidrogeológico Pico del Chaco (Vargas, 1982).

En el Cuadro II se presenta los límites superiores de aguas para consumo ganadero. En las Figs. 3A y 3B se representa una zonificación del Chaco Paraguayo, en relación al residuo seco, sobre la aptitud de las aguas de los acuíferos confinados / semiconfinados para consumo ganadero.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos la colaboración del Dr. Massimo Groce por la traducción del resumen al inglés.

REFERENCIAS

CATALAN L., J. G., 1981. Química del Agua, Talleres Gráficos Alonso S.A., Madrid, España, 423 p.

GOBIERNO
de
Cecilia
Asínc

HEM, C.
teris
Paper

LOGAN
U.S.

OOSTERBA
Subte
De, ar
lar N

VARGAS,
Corve
COPIR

Sergio Ech
de Lab., at
en el "en
Formación
Geoquímica
desempaña

Eugenio Go
Paraguayo.
Paragu
esc. 1-5, 1
congresos
Dest al
Licenciado
candidato

Miguel orre
de Hidroge
desempaña
tos de inv
la fun. in

y
un
los
5 000
se ha
a o-
par-
os en
a de
do
2 000
e
a las
zhas
de los
s de
risco
do al
r uea
al lad
para
to de
a de
stidio
aguas
una
so.
os /
or la
Alonso

GOBIERNO NACIONAL/OEA, 1983. Suelos y Aptitud de Uso de la Tierra del Chaco Paraguayo (autor : Costa de Lemos, Raymundo), Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado del Chaco, Asunción, 105 p.

HEM, J.D., 1962. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Geological Survey Water - Supply Paper 1473, U.S., 268 p.

LOGAN, J., 1965. The Interpretation of Chemical Analyses of Water U.S. Agency for International Development, Recife-Brazil, 89 p

OOSTERBAAN, A.W.A., 1988. Evaluación Hidroquímica del Agua Subterránea en los Acuíferos Profundos en el Chaco Oeste, Departamento de Agua para el Chaco (CNDRICH-MDN)/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Filadelfia, 27 p.

VARGAS, R., 1982. Catálogo de Perforaciones del Impenetrable, Convenio de Asistencia Técnica y Financiera en Agua, CHACO - COFIRENE SA, Resistencia - Chaco, Argentina.

* * * * *

Sergio Echeverría es formado por la Facultad de Bioquímica de la Universidad Federal de Paraná. Jefe de Laboratorio Hidroquímico del Dpto. Agua para el Chaco desde el año 1970. Cursos de especialización en el Centro Regional de Aguas Subterráneas de San Juan - Argentina y en el Centro Internacional de Formación de Ciencias Ambientales (CIFCA), Madrid - España. Realizó Curso de Posgraduación en Geoquímica en la Universidad Federal Fluminense, Niteroi - Río de Janeiro, Brasil. Actualmente desempeña el cargo de Director del Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco (CNDRICH-MDN)

Eugenio Godoy V. trabaja desde 1976 en la evaluación de los recursos de aguas subterráneas del Chaco Paraguayo. Participó como contraparte nacional en el Proyecto PAR/83/005 Mapa Hidrogeológico del Paraguay, y actualmente forma parte del equipo ejecutor del Mapa Hidrogeológico de América del Sur, esc. 1:5.000.000 (UNESCO/ROSLAC). Es coautor de artículos técnicos-científicos presentados en congresos y simposios en el exterior. Se desempeña como Hidrogeólogo en el Proyecto PAR/88/009 "Desarrollo de Recursos Hídricos del Chaco Paraguayo" (Gobierno Nacional/PNUD). Obtuvo el título de Licenciado en Ciencias (Geología) en 1983 en el Instituto de Ciencias Básicas (UNA) y actualmente es candidato a Master en Geociencias (Hidrogeología) por la Universidad Federal de Pernambuco - Brasil.

Miguel Orrego se graduó en Geología en 1983 en el Instituto de Ciencias Básicas (UNA). Realizó curso de Hidrogeología General y Aplicada en la Universidad Complutense de Madrid-España en 1985. Se desempeña como Hidrogeólogo en el Departamento de Agua para el Chaco desde 1972. Participó en proyectos de investigación y desarrollo de aguas subterráneas en el Chaco Paraguayo, actualmente desempeña la función de Jefe de Operaciones del Dpto. de Agua para el Chaco en Filadelfia.

CUADRO I

FOTABILIDAD DE LAS AGUAS DE LOS ACUIFEROS DEL CHACO
PARA CONSUMO HUMANO

DEPARTAMENTO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA EL CHACO (CADRICH-MDN)

	VALOR ACONSEJABLE.	VALOR ACEPTABLE	LIMITE TOLERABLE PARA CORTO PLAZO
Residuo Seco	1.000	2.000	2.800
Cloruros (Cl ⁻)	250	500	750
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	250	500	700
Sodio (Na ⁺)	115	230	460
Mg/12 + Ca/20	10	20	40
Conductividad Eléctrica	1.330	2.760	3.900

Todos en mg/l, exceptos Mg/12 + Ca/20 en miliequivalentes por litro de agua y la Conductividad Eléctrica en micromhos/cm

FUENTE: H. SCHOELLER, EL PROGRAMA III - ESTUDIO HIDROGEOLOGICO
PICO DEL CHACO (VARGAS, 1982) Y
CALIFORNIA, 1972 (CATALAN, 1981).

DEPARTAME

Espece
Aves
Porcinos
Equino
Bovinos (
Bovinos (
Ovinos

RS : R

Todos er m

FUELE

CUADRO II

LÍMITES DE AGUAS PARA CONSUMO ANIMAL

DEPARTAMENTO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA EL CHACO (CNDRIK-MDN)

Especie	A P T A				T O L E R A B L E			
	RS	SO ₄ ²⁻	Mg ⁺⁺	CE	RS	SO ₄ ²⁻	Mg ⁺⁺	CE
Aves	2.000	---	---	2.700	2.860	---	---	3.900
Porcinos	3.600	---	---	5.000	4.290	---	---	6.000
Equinos	4.700	---	---	6.600	6.435	---	---	9.000
Bovinos (leche)	5.600	2.400	360	7.900	7.150	2.800	400	10.000
Bovinos (carne)	7.000	2.600	450	9.900	10.000	3.000	500	13.500
Ovinos	7.700	3.000	480	10.900	12.200	3.500	550	16.000

RS : Residuo Seco - SO₄²⁻ : Sulfato - Mg⁺⁺ : Magnesio
CE : Conductividad eléctrica

Todos en miligramos / litro de agua, excepto la CE en micromhos/cm

FUENTE : O. S. N. (1975) - J. A. CARRAZZONI en " GANADERIA
SUBTROPICAL ARGENTINA " INTA E.E.R.A. PCA. ROQUE
SAENZ PENA 1976 en VARGAS (1982), y HEM (1962) p. 241

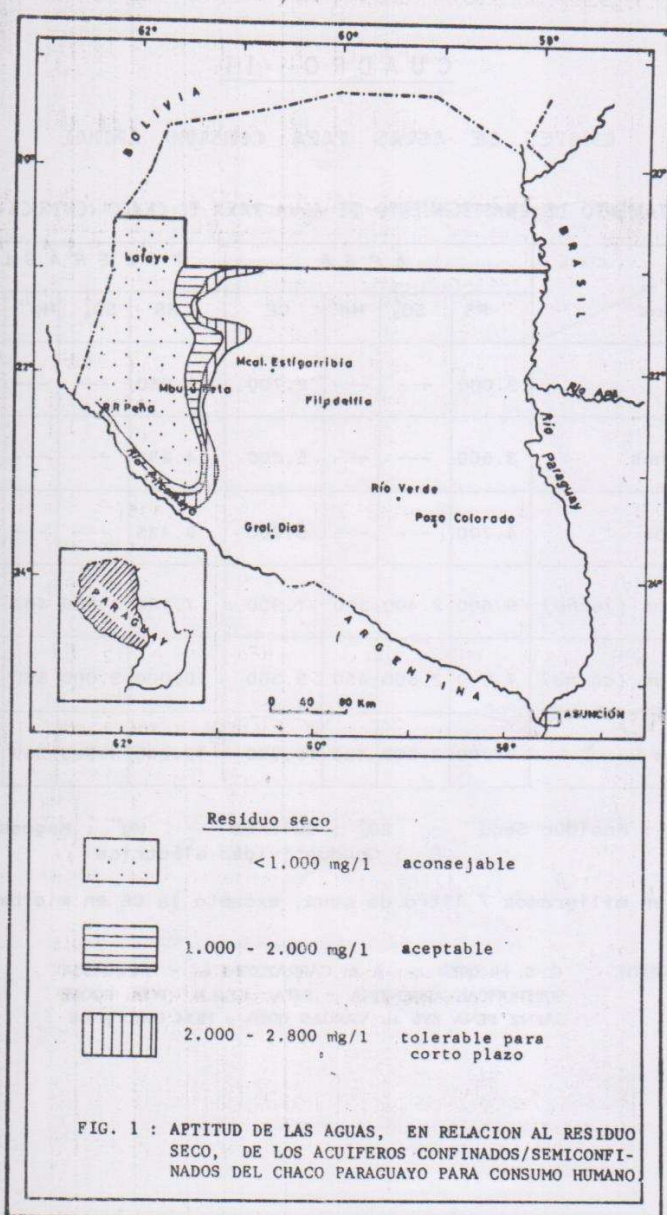
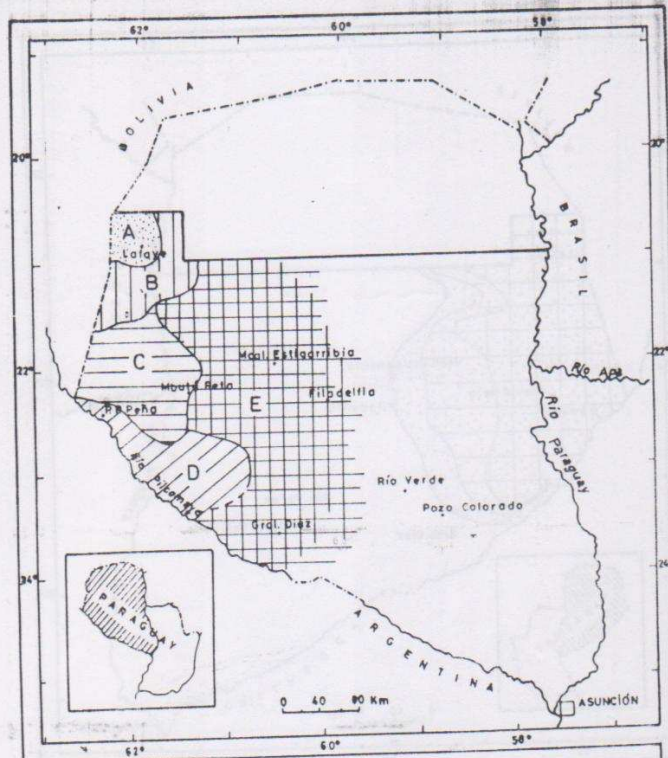


FIG. 1 : APTITUD DE LAS AGUAS, EN RELACION AL RESIDUO SECO, DE LOS ACUIFEROS CONFINADOS/SEMICONFINADOS DEL CHACO PARAGUAYO PARA CONSUMO HUMANO.








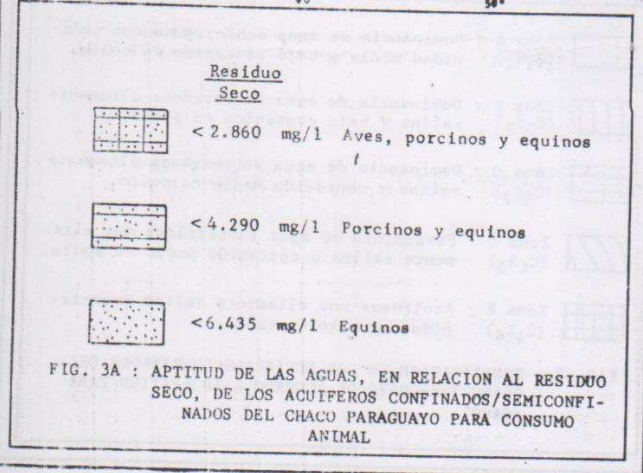
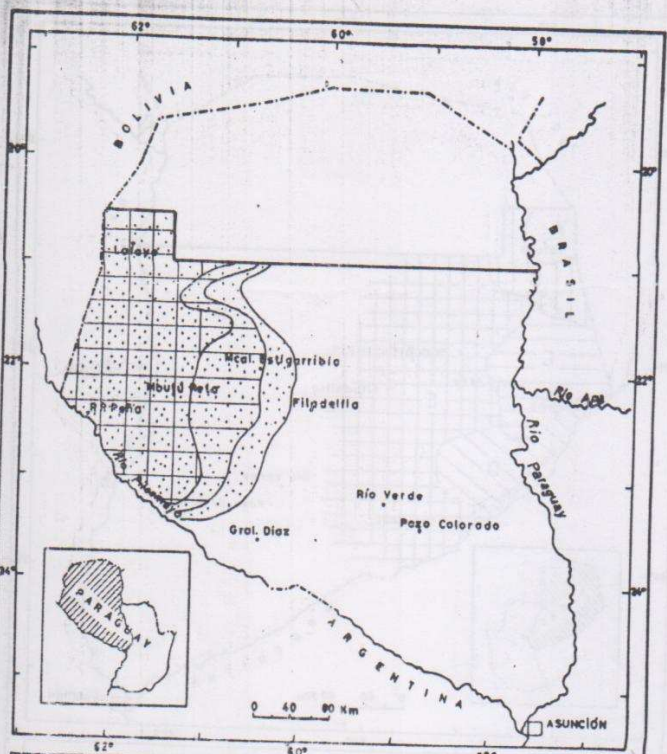
- 
 Zona A : Dominancia de agua subterránea con salinidad media y bajo contenido en sodio. (C₂S₁)
- 
 Zona B : Dominancia de agua subterránea altamente salina y bajo contenido en sodio. (C₃S₁)
- 
 Zona C : Dominancia de agua subterránea altamente salina y contenido medio en sodio. (C₃S₂)
- 
 Zona D : Predominio de agua subterránea muy altamente salina y contenido medio en sodio. (C₄S₂)
- 
 Zona E : Acuíferos muy altamente salina y contenido muy alto en sodio. (C₄S₄)

FIG. 2: ZONIFICACION DE LOS ACUIFEROS CONFINADOS DEL CHACO PARAGUAYO DE ACUERDO A SU APTITUD PARA RIEGO.



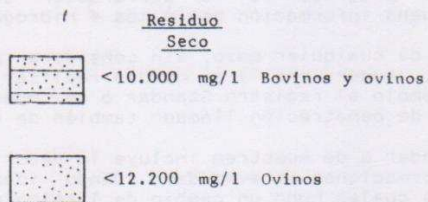
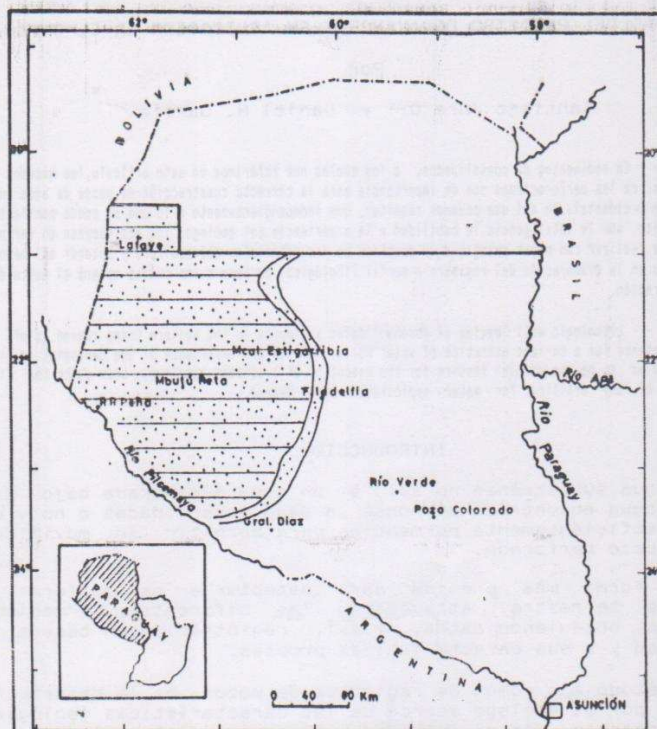


FIG. 3B : APTITUD DE LAS AGUAS, EN RELACION AL RESIDUO SECO, DE LOS ACUIFEROS CONFINADOS/SEMICONFINADOS DEL CHACO PARAGUAYO PARA CONSUMO GANADERO

UTILIDAD DEL REGISTRO DE AVANCE Y SU APLICACION EN EL CHACO

Por

Santiago Jara G. y Daniel H. García *

RESUMEN - - En sedimentos no consolidados, a los cuales nos referimos en este artículo, los métodos de registros de las perforaciones son de importancia para la correcta construcción de pozos de agua en la Región Occidental. De ahí que podamos resaltar, que independientemente a lo que se pueda manifestar por escrito, son la inteligencia, la habilidad y la experiencia del geólogo, los que cuentan en definitiva para realizar con mayor exactitud un muestreo de los materiales del acuífero y obtener así mayor precisión en la elaboración del registro o perfil litológico, en base a los cuales estará el éxito de la perforación.

ABSTRACT - - Lithologic well logging of unconsolidated sediments in the Western Chaco region is of basic importance for a correct execution of water wells. Ability and experience of the geologist in field work proved to be the crucial factors for the execution of a correct sampling, upon which the final success of any drilling for water exploitation will depend.

INTRODUCCION

El agua subterránea no solo es un agua encontrada bajo tierra, es agua encontrada en rocas ya sean consolidadas o no y que son lo suficientemente permeables para permitir su movimiento hacia un pozo perforado.

La forma más precisa para detectarla es perforar la superficie terrestre atravesando las diferentes formaciones geológicas, obteniendo datos, y así, registrarlos en base a su profundidad y a sus características propias.

El método más común de registros de pozos, es la descripción realizada por el geólogo acerca de las características geológicas de cada estrato, la profundidad, el espesor y la velocidad de avance individual de ellas.

Así, la descripción de los materiales subsuperficiales, obtenidos durante el progreso de la perforación son datos esenciales para una buena información geológica e hidrogeológica.

En perforaciones de cualquier pozo, sin considerar el método utilizado (Rotativas, Auger, etc.) se pueden realizar precisos registros como por ejemplo el registro Standard o de muestreo, y el registro de tiempo de penetración llamado también de avance.

El registro Standard o de muestreo incluye la descripción y el espesor de las formaciones atravesadas, dando idea de las profundidades en las cuales hubo un cambio de litología, y de

* Departamento de Abastecimiento de Agua Para el Chaco
Casilla de Correo 984
Filadelfia - Chaco

acuerdo a
también lo

Los r
avance, t
ocurren e
tomadas c
barras ut
el registr
circulaci

El
formación
perforación
tomadas
litología
el cur
levantada
tha Ar

La
propor
to, el co
idea del
profund
obtención
para a
bién, un
del caud

U
para sel
tamaño de

Una
hidráulic
para re
superfici
tiene cor

fin a gi
Cuando
luego f
aparecen
arrast. a
de qu s
más fac
del pozo
fracción
la form
exact. u

acuerdo a esto, detectar las capas portadoras de agua, como así también los niveles en las cuales éstas se encuentran.

Los registros de tiempo de penetración, también llamados de avance, indican donde las variaciones litológicas probablemente ocurren, siendo además muy valioso por ser una unidad de longitud tomadas cada 1, 3 ó 6 metros según sea la longitud de las barras utilizadas. Un avance también podría ser mantenido sobre el registro de tiempo de todos los cambios de barreno; pérdida de circulación de fluidos, etc.

REGISTRO STANDAR DE PERFORACION DE POZOS (MUESTREO)

El registro Standar, es un registro "in situ" de las formaciones litológicas atravesadas al realizarse una perforación. Esto es obtenido por observaciones de las muestras tomadas de las diferentes secciones del corte en cada cambio de litología. El geólogo observa y registra el barro de retorno, el cual está mezclados con las muestras del corte que son levantadas por el fluido en el método rotativo. (Department of the Army and the Air Force, 1965).

La descripción de muestras en formaciones no consolidadas proporcionan datos básicos para el diseño del pozo, aparte de esto, el comportamiento o acción del equipo de perforación dará una idea del carácter de la formación y con cierta exactitud la profundidad en que ocurre un cambio de formación. La buena obtención de muestras proporciona la información básica para la construcción de un pozo de producción, así como también, aumenta la posibilidad de efectuar una estimación razonable del caudal del pozo.

Un análisis granulométrico de la muestra obtenida, ayuda para seleccionar las medidas de abertura del caño filtro y del tamaño de la grava de empaque.

Una de las limitaciones de las perforaciones rotativas hidráulicas (Fig.1), es que depende del fluido de perforación para transportar los recortes del terreno (cuttings) hasta la superficie donde recién se podrán recoger las muestras. Ello tiene como resultado cierta clasificación hidráulica de la arena

fina a gruesa, de manera que éstas tienden a aparecer separadas. Cuando el fluido arrastra estos materiales a la superficie y luego fluye a la fosa de decantación, los sedimentos más finos aparecen precediendo a los gruesos. Estos sedimentos finos son arrastradas más lejos en la zanja del circuito de inyección antes de que se logre su decantación. Los materiales gruesos se separan más fácilmente y se depositan en la zanja más cerca de la boca del pozo; así el geólogo, tiene la tarea de juntar y combinar las fracciones segregadas para formar una muestra representativa de la formación atravesada por el trépano de perforación. La exactitud de cada muestreo depende de manera muy importante de la

habilidad y experiencia del geólogo. Por ejemplo, si se pierde mucha arena fina durante el muestreo, la muestra parecerá muy gruesa y dará una impresión errónea de alta permeabilidad. Las medidas de la abertura del caño filtro, basadas en el análisis granulométrico de dicha muestra serán demasiado grandes para asegurar un pozo con bombeo libre de arena, o bien se podría elegir un empaque de grava que sea demasiado grueso, teniéndose como resultado también, un pozo que bombee arena (Barlitt, 1976).

En el caso de la perforación con barreno (Auger), (Fig.2) el muestreo se hace directamente en la boca del pozo, describiendo el material dejado por el barreno en la superficie a intervalos regulares, en algunos casos cada 1,5 metros. Este método como trabaja en seco, permite la exacta clasificación de la granulometría y ubicación de la parte saturada en una perforación. Posteriormente se lo clasifica y estudia para determinar la identificación y ubicación de la parte saturada y el nivel piezométrico en la sección atravesada.

REGISTRO DEL TIEMPO DE PENETRACION (AVANCE)

Es un preciso registro del tiempo requerido para perforar cada metro de profundidad. Este dato de perforación suministra una importante información acerca de las formaciones litológicas, puesto que el carácter del material penetrado por el trépano determina la velocidad con la cual éste prosigue. El técnico observa si la velocidad de perforación aumenta o disminuye, y ésta información la interpreta y registra a su manera, sin embargo, muchos ignoran el valor de un registro sistemático del tiempo de avance cada metro.

Otros factores, además del carácter de cada formación, también afectan a la velocidad de penetración; éstos incluyen: peso del trépano, filo, tipo y diámetro del mismo, presión de la bomba de lodo y velocidad de rotación. Para mejores resultados, éstos podrían ser mantenidos cercanos a una constante, a fin de que la penetración pueda avanzar bajo condiciones razonablemente uniformes. Un cuidadoso registro del tiempo de avance, muestra sin embargo que ninguno de éstos factores mecánicos influyen en la velocidad de penetración, tanto como lo hacen la textura del estrato que está siendo perforado.

El peso del trépano se incrementa cuando el pozo se profundiza y las barras de sondeo adicionales son agregadas, pero la interpretación del tiempo de avance es una cuestión relativa y el incremento gradual de dicho peso no afecta seriamente la utilidad de estos resultados.

Los estratos arenosos con poco material fino, son perforados rápidamente y sin vibración, mientras que en las arenas arcillosas se hace más lentamente.

En arcillas ó limos poco compactados la perforación es moderadamente lenta, pero en arcillas compactadas, y por lo general con abundancia de yeso ó carbonato, la perforación es lenta y acompañada de fuerte trepidaciones de la mesa rotatoria. En éstos casos la máquina trabaja frenada, para lo cual hay que estar muy atento y poder interpretar los datos, obtenidos del registro de avance.

Problema de vibración ocurre en arenas con concreciones de carbonatos, comunes en el Chaco, debido a que el trépano penetra con velocidad y golpea, con la consiguiente vibración de la torre y mesa rotatoria. Estas manifestaciones de la máquina, deben ser interpretadas por el técnico junto con el perforista debido a que también influye en el tiempo de perforación. La Fig 3 muestra el perfil de avance tipo de un pozo.

APLICACION DEL REGISTRO DE AVANCE EN EL CHACO

Se puede decir que existe una muy buena correlación entre el registro de avance y los registros geofísicos del pozo, debido a que los sedimentos no consolidados del Chaco están constituidos predominantemente por una alternancia de arena fina, limo arcilloso ó arenoso y arcilla.

En el Chaco paraguayo, salvo algunas excepciones, los estratos de arena son más abundantes que los de limo y arcilla, conformando el 58 a 74 % de la columna estratigráfica atravezada en una perforación hidrogeológica, es decir, hasta los 200 - 300 metros de profundidad. Pero en general pueden reconocerse dos secciones de diferente composición litológica: a) superior, con cantidades más ó menos iguales de arena y limo / arcilla; y b) inferior, con neto predominio de arena (Naciones Unidas, 1978).

En cuanto a la calidad y cantidad de agua subterránea en el Chaco, se puede determinar tres zonas, cada una con características propias (Fig. 4).

Zona 1 - - Podemos demarcarla entre Gral. Garay y Ea. La Paria, donde los mejores acuíferos se presentan por debajo de los 110 a 130 metros, razón por la cual aconsejamos mayor atención a los estratos atravezados por debajo de dicha profundidad. Existe una marcada relación entre los registros de avance y los registros eléctricos de un pozo de esta zona.

Es importante tener especial atención al área de las dunas entre Gral. Garay y Nueva Asunción por la presencia de potentes estratos de arena seca que, debido a su gran permeabilidad, ocasionan pérdidas del fluido de perforación, siendo necesario, en muchos casos engrosar (espesar) el fluido para reducir el régimen de flujo dentro de estas formaciones.

Un perfil tipo de ésta área (Fig. 5) muestra que hay ausencia de material arcilloso de manera que la perforación es bastante rápida, los tiempos de avance en arena seca oscilan entre los 0,40 y 1,03 minutos/metro, mientras que en un limo están en el orden de los 2,10 a 2,25 minutos por cada metro de perforación. Los sedimentos son en su mayoría arena fina de color castaño y limo, a veces arenoso. Este último presenta concreciones de carbonato y no contiene yeso, que es tan común en el Chaco.

Un perfil tipo entre Siracuas - Tte. Enciso - Ea. La Patria (Fig. 6) presenta una perfecta correlación entre el registro de avance y los perfiles eléctricos del pozo. Se puede observar una alternancia entre limo arcilloso a arenoso, arena fina y arcilla, estas última presentando un color rojizo y concreciones de yeso.

Pasando los 95 a 100 metros de profundidad los sedimentos pelíticos no presentan yeso, únicamente concreciones de carbonato que también están presentes en las arenas. Los acuíferos con agua de buena calidad se encuentran por debajo de los 110 a 130 metros de profundidad, llegando a presentar espesores de más de 25 m. Por lo general se nota un predominio de arena sobre los materiales limo arcillosos.

Zona 2 - - Aproximadamente se extiende desde el Safari Ranch hasta Carmen 1. En esta área los acuíferos buenos están por debajo de los 150 a 170 metros de profundidad. El perfil tipo de un pozo (Fig. 7) presenta estratos de menor potencia que la zona anterior con un marcado aumento de capas de limo arenoso y arcillas con intercalaciones de arena fina. Se observa presencia de yeso limitado solamente a las arcillas, en cambio las concreciones de carbonato en casi todo el perfil. Las arcillas son de color pardo oscuro, untuosas y plásticas, ocasionando tiempo de avance más lento (perforación más lenta), promedio de 3 - 5 minutos/metro. Por otro lado, también afecta a la viscosidad del fluido de perforación, el cual debe ser aliviado regularmente. Las arenas presentan tiempo de avance entre 28 - 45 segundos / metro, y la perforación total presenta un promedio de 15 m/h (incluye recirculación, cambio de barras, etc.).

Zona 3 - -Engloba el Chaco Central y el Bajo Chaco. Un perfil tipo del pozo de esta zona presenta una marcada presencia de arcilla con abundante yeso, limo y poca arena fina, a veces contiene partículas ferruginosas. Todos los acuíferos (freáticos y confinados/semiconfinados) presentan agua salada, ocasionalmente los acuíferos superficiales (freáticos) presentan agua de buena calidad, las que son de poca potencia y se encuentran ubicados mayormente en paleocauces.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos la colaboración del Dr. Massimo Groce por la traducción del resumen al inglés.

que hay
ación es
cilan
un limo
metro de
d color
nresio-
en el

Ea. La
el regis-
de obser-
ena fina
concre-

ed mentos
carbonato
con agua
130
de más de
bre los

Ranch
st, por
tipo de
ra zona
arci-
encia de
nresio-
on de
erno de
3 - 5
itud del
armente.
undos /
m/h

perfil
encia de
a veces
raticos
almen-
agua de
ccentran

por la

REFERENCIAS

NACIONES UNIDAS, 1978. Investigación y Desarrollo de Agua Subterránea en el Chaco. Informe Técnico. N.Y. 93 págs.

BARLITT, HARL R., 1976. The Johnson Drillers Journal. U.S.A. boletin.

DEPARTMENTS OF THE ARMY AND THE AIR FORCE, 1965. Well Drilling Operations, technical Manual No.5 - 297, Air Force Manual No.85 23. Washington,D.C. 249 Págs.

DEPARTAMENTO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA EL CHACO, 1989. Archivo de pozos. Filadelfia - Chaco.

* * * * *

Santiago Jara Gamarra se desempeña como geólogo en el Departamento de Abastecimiento de agua para el Chaco (CNDRICH - MDN). Participó del Proyecto PAR /83/005 Mapa Hidrogeológico del Paraguay (Gobierno Nacional / PNUD). Obtuvo el Título de Lic. Geólogo en el Instituto de Ciencias Básicas - UNA.

Daniel H. García S. se desempeña como geólogo del Departamento de Abastecimiento de Agua para el Chaco (CNDRICH - MDN). Participó de 4 cursos de post grado en Desarrollo de Aguas Subterráneas, auspiciado por la Facultad de Ingeniería - UNA y el Rotary Club Internacional. Obtuvo su Título de Lic. Geólogo en el Instituto de Ciencias Básicas - UNA.

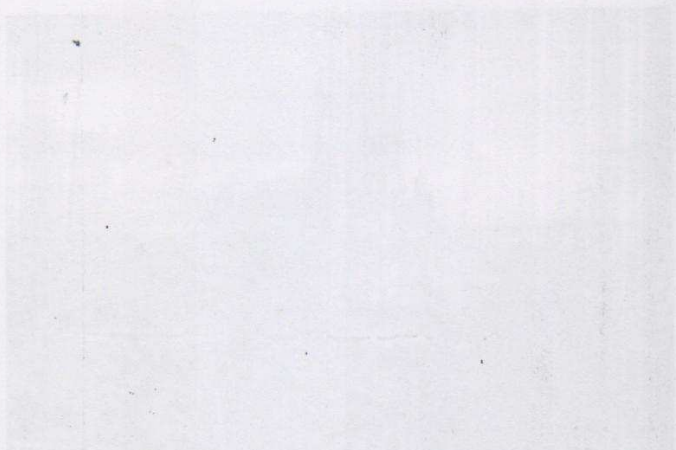




Fig.2 Máquina Auger en el momento de toma de muestra.

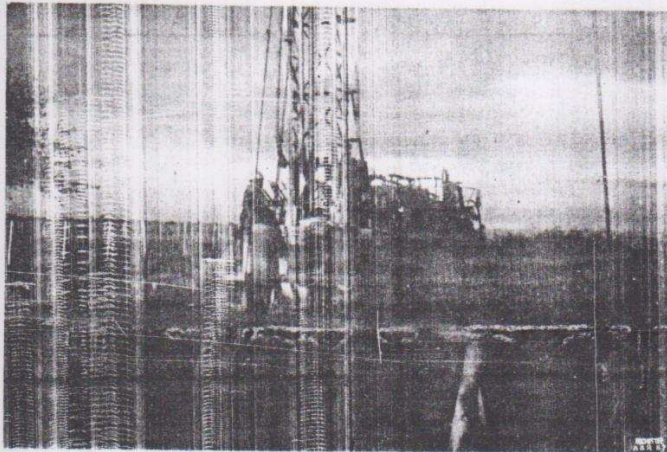


Fig. 1 Máquina Rotativa

ro
en
de
66
68
70
72
74

Fig.

Profundidad en metros		Tiempos de perforación		Tiempo promedio por metro				
de	a	min.	seg.	0	(min.)	1	3	5
66	66,25	4	05	Arcilla con grava	0	1	3	5
	66,50	3	58					
	66,75	3	50					
	67,0	3	40					
	67,25	4	10					
	67,50	4	07					
	67,75	4	01					
68	68,0	3	69	Arcilla lodosa	0	1	3	5
	68,25	4	03					
	68,50	4	30					
	68,75	4	50					
	69,0	4	50					
	69,25	4	45					
70	69,50		54	Arena Gruesa Limpia	0	1	3	5
	69,75		51					
	70,0		12					
	70,25		11					
	70,50		09					
	70,75		12					
	71,0		18					
72	71,25		23	Arcilla Gris	0	1	3	5
	71,50		27					
	71,75		20					
	72,0		18					
	72,25		12					
	72,50		14					
	72,75		12					
74	73,0		18	Arcilla Gris	0	1	3	5
	73,25		16					
	73,50		23					
	73,75		27					
	74,0		42					
	74,25	1	06					
	74,50		48					
74,75	1	08						
75,0	1	19						
75,25	1	26						

Fig.3 Perfil de avance tipo de un pozo.

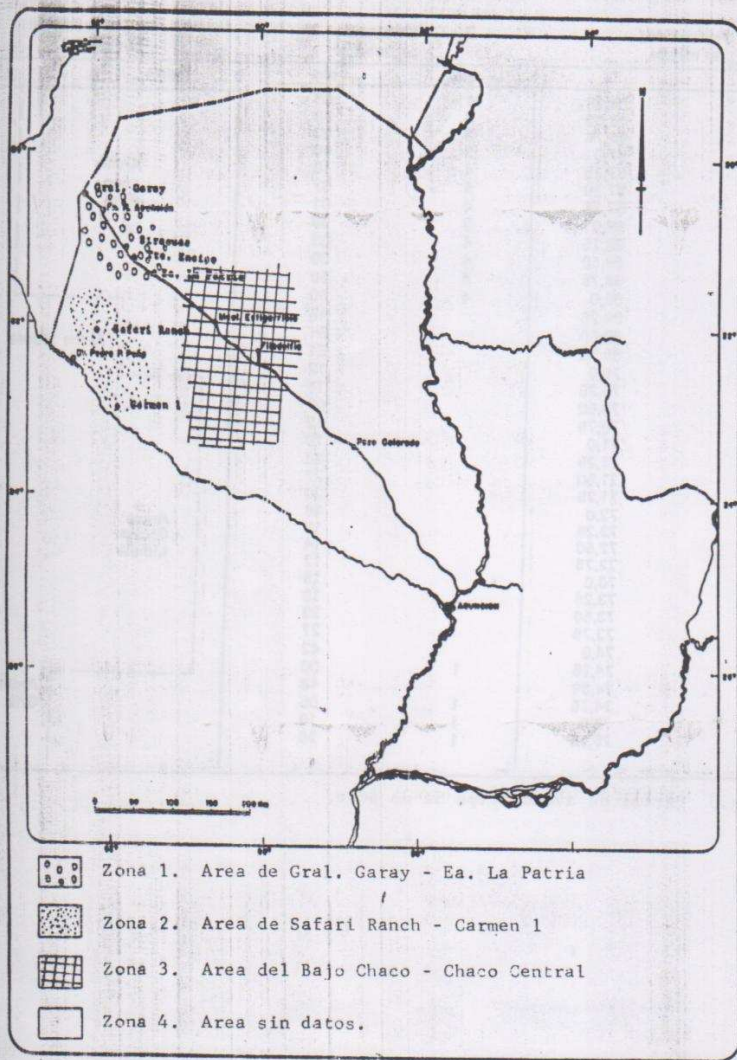


Fig. 4. Zonas en que se divide la Región Occidental.

Fig. 5

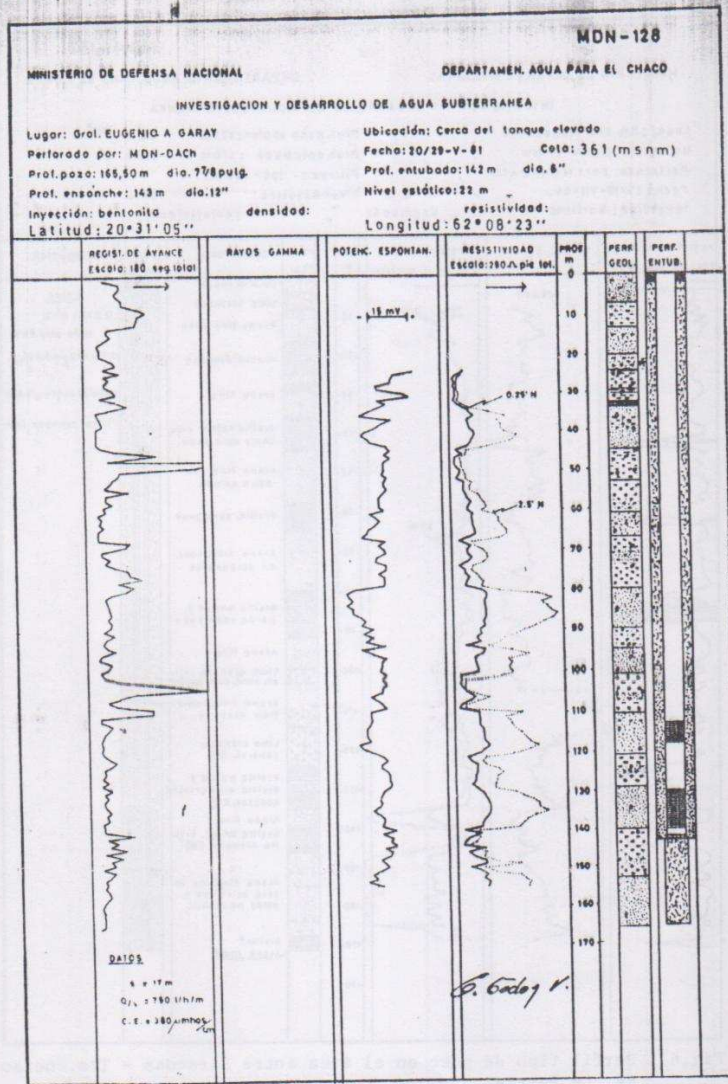


Fig.5 Perfil tipo de pozo en el área entre Gral. Garay - N.Asunción.

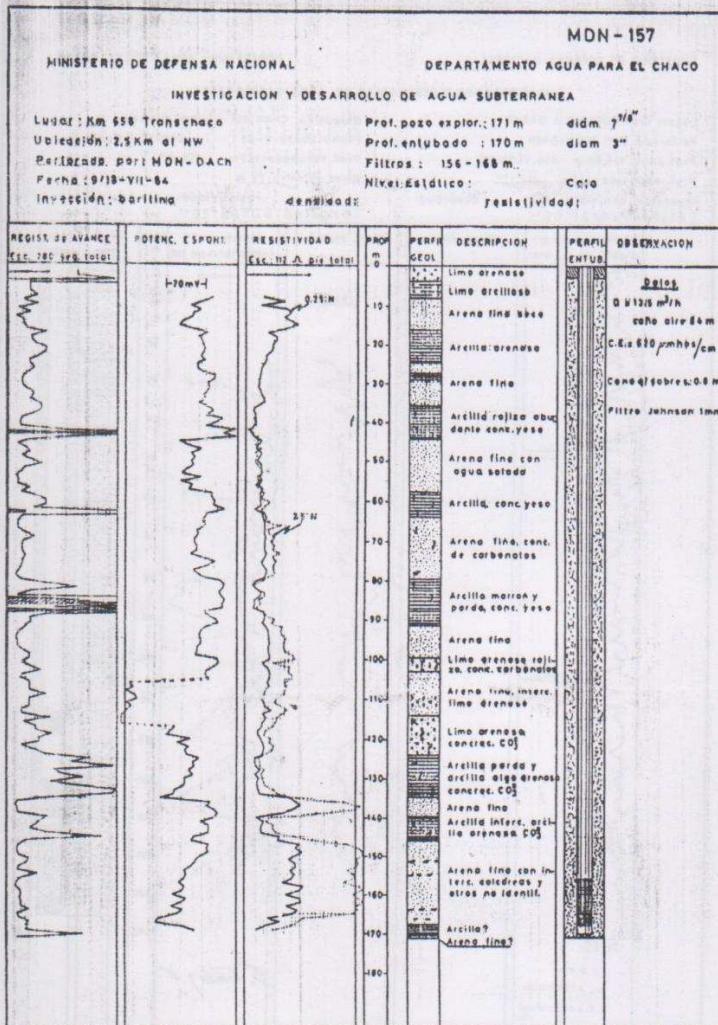


Fig. 6 Perfil tipo de pozo en el área entre Siracuas - Tte. Enciso
Ea. La Patria

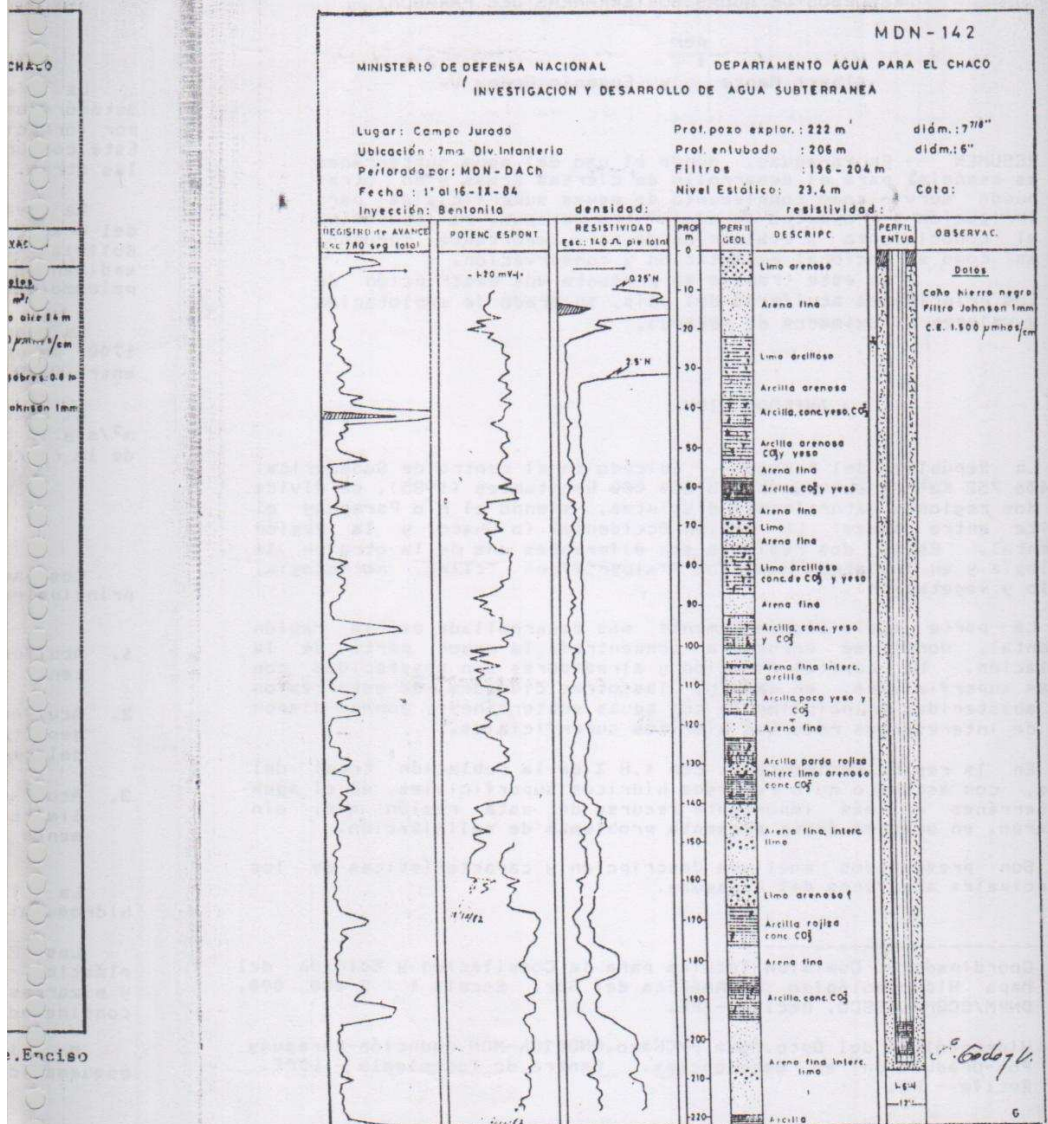


Fig.7 Perfil tipo de pozo en el área entre Safari Ranch - Carmen 1 81

RECURSOS DE AGUAS SUBTERRANEAS DEL PARAGUAY

por

1

2

Albert Mente y Eugenio Godoy V.

RESUMEN -- En Paraguay, donde el uso del agua subterránea es esencial para el desarrollo de ciertas áreas y en otras puede servir como complemento de aguas superficiales para irrigación y proyectos de suministro de agua, es imperativo el conocimiento y evaluación de este importante recurso, así como su racional explotación y conservación.

En este trabajo se presenta una descripción de los principales acuíferos del país, su grado de explotación y valores aproximados de recarga.

INTRODUCCION

La República del Paraguay, ubicado en el centro de Sudamérica, de 406 752 Km² de extensión y 3 550 000 habitantes (1985), se divide en dos regiones naturalmente distintas, siendo el río Paraguay el límite entre ambas: La Región Occidental (o Chaco) y la Región Oriental. Estas dos regiones son diferentes una de la otra en la geología y en los otros aspectos fisiográficos (clima, morfología, suelo y vegetación).

La parte socio-económicamente más desarrollada es la región Oriental, donde se encuentra concentrada la mayor parte de la población. La capital Asunción y alrededores son abastecidas con aguas superficiales, en cambio, las otras ciudades de esta región son abastecidas principalmente con aguas subterráneas, aunque dispongan de interesantes recursos hídricos superficiales.

En la región Occidental, con 1,8 % de la población total del país, con escaso o nulo recursos hídricos superficiales, es el agua subterránea el más importante recurso de esta región que, sin embargo, en grandes áreas presenta problemas de salinización.

Son presentados aquí una descripción y características de los principales acuíferos del Paraguay.

- 1 Coordinador, Comisión Técnica para la Compilación y Edición del Mapa Hidrogeológico de América del Sur, Escala 1 : 5 000 000, DNP/CCGM/UNESCO, Recife - PE.
- 2 Hidrogeólogo del Dpto. Agua p/Chaco. CNDRICH-MDN. Asunción-Paraguay Pos-Graduación en Geociencias. Centro de Tecnología - UFPE. Recife - PE.

La r
metamórfi
por formac
Este con u
las otras,

La e
del Gran C
Bolivia h
sedimen
paleozoica

La e
1700 mm e
entre 21-C

El cau
m³/s y ra
de la r

Los a
principale

1. Acuífe
ten
2. Acuífe
geolít
del re
3. Acuífe
límita
mente

La T
hidroquím

Las F
plástico -
y pizarras
conside, ad

En l
esquemáic

DESCRIPCION GENERAL

La región Oriental está constituida por rocas ígneas y metamórficas del Precámbrico (en sus límites Noroeste y Suroeste), y por formaciones sedimentarias pertenecientes a la Cuenca del Paraná. Este conjunto de rocas, afloran, de una manera secuencial unas sobre las otras, con buzamiento hacia el centro de la cuenca.

La región Occidental pertenece a la extensa cuenca sedimentaria del Gran Chaco. La que se extiende desde la Sierra de Santiago en Bolivia hasta la línea Sante Fé - Tucuman en la Argentina. Los sedimentos que rellenan esta cuenca, están constituidas por rocas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas.

La precipitación media anual varía desde 500 mm en el Noroeste a 1700 mm en el Sudeste del país. La temperatura media anual varía entre 21°C en el Sur a 25°C en el Norte.

El caudal medio del río Paraguay, en Asunción, es cerca de 2 015 m³/s y la del río Paraná, en Encarnación, antes de la construcción de la represa ITAIPU, era cerca de 11 800 m³/s.

LOS ACUIFEROS

Los acuíferos en el Paraguay pueden dividirse en tres grupos principales (Fig. 1) :

1. Acuíferos regionales de gran extensión y de importancia para obtener agua.
2. Acuíferos regionales de extensión restringida por su patrón geométrico natural y de cierta importancia para la explotación del recurso.
3. Acuíferos locales con dimensiones reducidas o con circulación limitada a líneas esporádicas, con caudales bajos, útiles solamente para demandas locales.

La Tabla I muestra las características hidrogeológicas e hidroquímica de los acuíferos, y la Tabla II la recarga estimada.

Las Formaciones Chaco Madrejón (Tcm) - constituida por arcilla plástica -, San Alfredo (Dsa) - formada por areniscas finas micáceas y pizarras -, e Intrusivas (I) - rocas ígneas compactas -, no son considerados como acuíferos y por ello no son descriptos aquí.

En la Fig. 2 se presentan los cortes hidrogeológicos esquemáticos referentes a la región Oriental y Occidental.

1. ACUIFEROS REGIONALES DE GRAN EXTENSION

- A) Con importancia para obtener agua subterránea dulce. Incluyen los acuíferos : Cuaternario (Q), Chaco Alto (TQca), Chaco Norte (Qcn) y Misiones (Jm).

CUATERNARIO (Q). Acuíferos formados por los aluviones recientes no consolidados que cubren las áreas planas de drenaje de los principales ríos. Una de las más importante pertenece al río Paraguay. Hasta ahora el acuífero ha sido desarrollado localmente, en su mayoría por pozos cavados. La calidad del agua es generalmente buena.

CHACO NORTE (Qcn). Ocupa la parte extremo Norte de la región Occidental. No existen datos que permitan conocer las características hidrogeológicas de este acuífero. Su importancia es evidenciada en el Mapa Hidrogeológico de Bolivia, escala 1 : 2 500 000.

CHACO ALTO (TQca). Es un acuífero, con agua dulce, que se encuentra subordinado en la parte Noroeste de la región Occidental, y se presenta confinada o semiconfinada, en varios niveles, por debajo de los 50 - 150 m hasta aproximadamente 600 m de la superficie. Está constituido por una alternancia de arena y limo arcilloso o arenoso y en menor grado arcilla. Son frecuentes las concreciones de carbonato, tanto en las arenas como en el limo y arcilla. En estos últimos, a veces, también ocurren cristales o muy delgadas capas de yeso. Hacia el Este y Sureste pasa gradualmente a agua salobre, que define vagamente los bordes extremos de este acuífero. En algunas áreas está sobrepuesto por acuíferos con agua salada. Su permeabilidad es variable. El agua es extraída de pozos de 80 a 233 m de profundidad. El caudal medio es de 15 m³/h y el caudal específico medio es de 1,6 m³/h/m.

MISIONES (Jm). Es el acuífero más importante del Paraguay, equivalente al acuífero Botucatu del Brasil, ocupa 67 000 Km² en la región Oriental, aproximadamente 17 % del área total del país. Solamente 37 400 Km² del acuífero está expuesto, el resto está cubierto por derrames basálticos de la Fm. Alto Paraná (Serra Geral, BR). Está constituido por areniscas eólicas fina a media. Los pocos pozos perforados, para sistemas dispersos de abastecimientos, en la sección expuesta del acuífero, no permiten determinar algunas características hidráulicas de este acuífero.

- B) Sin importancia, por contener agua subterránea salada. Comprende los acuíferos : Chaco Bajo (TQcb) y Chaco (Tc).

CHACO BAJO (TQcb). Está constituido por una alternancia de arenas finas limosas, limos y arcillas, con intercalaciones delgadas de yeso y carbonato, su espesor puede alcanzar decenas de metros. Ausencia de agua subterránea dulce somera en cantidades significativas.

CHAC
limo, y
cente
te cont

2. ACUI

E
(Kac

ARJA

Occident

Está or

de abril

lo Eva

practi

surgente

apta par

ADRI

región

selección

acuífero

aun m

/h y el

PTI

generalm

espeso

permeabi

condicio

ciones

de 13 m³

agua e

cas de 1:

CA. DI

el de sa

Constitu

conglo m

profundid

es nor

relati an

* La dnc

Bajo (TQ

de la F

diversa

ocurrenci

Fm. Cl c

los prim

superior

sedimer a

6. Incluyen
Chaco
es recientes
e los princ
Paraguay.
en su mayo
nt buena.
de la región
ac rísticas
idenciada en
0.
que se encu
en al, y se
p debajo
ficie. Está
sco arenoso
regiones de
a. En estos
da capas de
salobre, que
En algunas
u permeabili
a 230 m de
específico
Paraguay,
20 km² en
del país.
Está
á (Serra
a media.
ras de
primiten
cúfero.
salada.
ac (Tc).
nancia de
al ciones
decenas
onra en

CHACO (Tc)*. Constituido por arena fina, arcilla, algo de limo, y lentes de yeso y halita, presentando un espesor de varias centenas de metros. Es un acuífero regional confinado que solamente contiene agua salada. Ver Fig. 2, corte hidrogeológico B - B'.

2. ACUIFEROS REGIONALES DE EXTENSION RESTRINGIDA

En esta categoría se incluyen los acuíferos : Agua Dulce (Kad), Adrián Jara (Kaj), Patiño (Kp) y Caacupé (Sc).

AGUA DULCE (Kad). Se encuentra en el Norte de la región Occidental y está constituido por arenisca friable, fina a media. Está confinada por una potente capa (varias decenas de metros) de arcilla plástica, a veces semiconsolidada, del Terciario. Se lo evalúa como de gran potencial hidrogeológico, aun prácticamente inexplorado. Un pozo perforado en este acuífero es surgente, presenta un caudal de bombeo de 18 m³/h. El agua es apta para abastecimiento.

ADRIÁN JARA (Kaj). Localizado en el extremo Noreste de la región Occidental. Está constituido por areniscas masivas y mal seleccionadas, teniendo un espesor máximo de 300 m, formando acuíferos freáticos y confinados. Los datos acerca de pozos son aun muy escasos, uno de ellos presentó un caudal original de 36 m³/h y el agua es apta para todo uso.

PATIÑO (Kp). Formado por areniscas friables, fina a media, generalmente con intercalaciones de arcilla y conglomerado. Su espesor se presenta en el orden de algunas centenas de metros. Su permeabilidad es muy variable. En el acuífero predominan condiciones hidráulicas libres, aunque a veces se presentan condiciones de artesianismo con surgencia. Los caudales de pozos son de 13 m³/h y los caudales específicos de 0.8 m³/h/m promedio. El agua es generalmente de buena calidad química. Las áreas periféricas de la capital Asunción explotan intensivamente este acuífero.

CAACUPE (Sc). Es uno de los acuíferos más desarrollado en el densamente poblado Dpto. Central de la región Oriental. Constituido por areniscas de granulometría media a gruesa con un conglomerado de base. Los pozos de este acuífero presentan profundidades media de 89 m y caudales medio de 13 m³/h. El agua es normalmente buena, pero puede variar a salobre en relativamente cortas distancias.

* La denominación Chaco Alto (TQca), Chaco Central (TQcc) y Chaco Bajo (TQcb) está relacionada a una división meramente arbitraria de la Fm. Chaco, basado en la necesidad de diferenciar los diversos acuíferos de esta formación, que presentan formas de ocurrencias, productividades y calidades químicas diferentes. La Fm. Chaco ocupa aprox. 2/3 de la región Occidental y comprende los primeros 1000 a 2000 m (máximo 5000 m) de los sedimentos superiores no consolidados y semiconsolidados de la cuenca sedimentaria del Gran Chaco.

3. ACUIFEROS LOCALES

En esta categoría se incluyen :

- A) Acuíferos de extensión muy limitada, como los lentes en formaciones sedimentarias y los bolsones de agua dulce encontrados en los sedimentos arenosos, que colmatan las distintas generaciones de cauces del Chaco. Son : Chaco Central (TQcc), Acaray (Ka), Independencia (Pi), Coronel Oviedo (Cco), Palmar de las Islas (Cpi) e Itacurubí (Si).

CHACO CENTRAL (TQcc). Los acuíferos, con calidades del agua que varían ampliamente de dulce a salobre, se presentan en forma de pequeños bolsones en ambiente de agua salada, en los rellenos aluviales de antiguos cauces en el centro y Sur de la región Occidental. Su permeabilidad es variable y los caudales de los pozos se presentan con un valor de 7 m³/h promedio.

ACARAY (Ka). Equivalente al acuífero Baurú (Kb) del Brasil. Constituido por areniscas finas. Se encuentran distribuidas irregularmente en la región Oriental sobre la Fm. Alto Paraná. Hasta ahora se sabe poco sobre sus propiedades de almacenamiento de agua, pero su potencial para el desarrollo parece ser relativamente bajo, teniendo en cuenta sus dimensiones geométricas reducidas.

INDEPENDENCIA (Pi). Equivalente al acuífero Guatá (Pg) del Brasil. Se compone de un conjunto de formaciones geológicas, predominantemente arenoso, de granulometría fina a gruesa, alternando con secuencias de areniscas y siltitas. Los caudales medio están en el orden de 10 m³/h y el caudal específico medio es de 0.5 m³/h/m. La calidad química del agua es buena.

CORONEL OVIEDO (Cco). Equivalente al acuífero Aquidauana (Pca) del Brasil. Son depósitos de glaciación continental, constituido por tillitas, areniscas, lutitas y varvitas. La heterogeneidad de sus sedimentos tiene como resultado bajos caudales, promedio de 7,6 m³/h y caudales específicos, promedio de 0.37 m³/h/m. Aunque mayormente contienen agua de buena calidad, a veces se encuentra agua con mayor mineralización.

PALMAR DE LAS ISLAS (Cpi). Ubicado en el Norte de la región Occidental. Constituido por areniscas, conglomerados y diamictitas. Las características hidrogeológicas son aun poco conocidas. Un pozo en este acuífero presentó un caudal original de 18 m³/h, con agua de buena calidad.

ITACURUBI (Si). Suprayacente al acuífero Caacupé (Sc). Está formado por la secuencia de tres formaciones, de los cuales la del medio consiste en depósitos predominantemente arcillosos, que lo torna impermeable. La arenisca fina de las otras formaciones suministra solamente caudales bajos.

A) TQ
(JKsg)
Sumin. at
1,5
La carid

CFRR
claras m
se p
rocas.
permeabi

ITAP
Local
do por d
en el d
explo d

BraA
metam
zonas f
El caud:
genera

Low
renove de
la Cuenca
que la
tipo y es
profundid
estudios
acuífero
separació
caudal

La a
moment
superfici
resultado
debido a
del Est
fisiogr
modulos d
Estado de
que la

B) Acuíferos muy restringidos, cuya existencia esta relacionada a las fallas, fisuras y fracturas en rocas masivas. Ellos son : Alto Paraná (Kap), Cerro León (Sc1), Itapucumi (Ei) y Basamento Cristalino (PE).

ALTO PARANA (Kap). Equivalente al acuífero Serra Geral (JKsg) del Brasil. Constituido por coladas de basaltos. Suministra caudales medios de 18 m³/h y caudales específicos de 1,5 m³/h/m. La profundidad media de los pozos es de 100 m. La calidad del agua es buena.

CERRO LEON (Sc1). Constituido por cuarcitas y areniscas claras masivas. Afloran en el Norte de la región Occidental. No se posee ningún dato sobre perforaciones realizadas en estas rocas. Su equivalente en Bolivia presenta acuíferos por permeabilidad secundaria.

ITAPUCUMI (Ei). Equivalente al Grupo Corumbá del Brasil. Localizado en el extremo Norte de la región Oriental. Constituido por calizas. Espesor superior a 200 m. El agua se encuentra en el conjunto de fisuras o fracturas. El acuífero aun no está explotado.

BASAMENTO CRISTALINO (PE). Constituido por rocas ígneas y metamórficas, es prácticamente impermeable. El agua circula por zonas fracturadas hasta profundidades de 100 m aproximadamente. El caudal medio de los pozos es de 3.5 m³/h. El agua es en general de buena calidad.

RECARGA ESTIMADA

Los acuíferos de la región Oriental del Paraguay son muy renovados, principalmente por la precipitación directa. Estudios en la Cuenca del Paraná, en el Estado de São Paulo, Brasil, indicaron que la cantidad de recarga esta en función de la precipitación, tipo y espesor de los suelos, la vegetación, la evapotranspiración y profundidad del nivel freático (Mero, F. y Gilboa, Y., 1974). De estos estudios son conocidos los módulos de recarga de las unidades acuíferas de la Cuenca del Paraná, basados en una metodología de separación de los componentes de superficie y subterráneo de los caudales de ríos (Gilboa, Y. et al., 1976).

La aplicación de un método similar en el Paraguay es por el momento imposible; por falta de datos pertinentes, tanto de superficie como subterráneos. Sin embargo, es posible adaptar los resultados de aquel estudio para la región Oriental del Paraguay, debido a las condiciones muy similares entre esta parte del país y del Estado de São Paulo, Brasil. Basandose en el estudio fisiográfico de ambas regiones, parece seguro concluir que los módulos de infiltración en Paraguay pueden ser más altos que los del Estado de São Paulo. Adaptando los valores encontrados, se estima que la infiltración profunda varía entre 1 y 5 por ciento de la

precipitación total. Evidentemente estas estimaciones requerirán una verificación, cuando en el futuro se disponga de más datos.

La recarga de los acuíferos profundos de la región Occidental o Chaco, posiblemente se produzca por infiltración directa de la precipitación y de los ríos en territorio Boliviano, específicamente a lo largo de una faja de piedemonte, de 15 a 20 Km de ancho, que corre paralelamente a los bordes montañosos subandinos. La magnitud del flujo subterráneo a través de la frontera Paraguay - Bolivia de 200 Km de ancho fue calculada de acuerdo con la ley básica de Darcy. (vease Tabla II).

DISCUSION

Los principales acuíferos, con relación a la disponibilidad de agua, caudal de pozos y volúmenes almacenados, son: el acuífero Misiones (Jm) y el Cuaternario (Q), principalmente a lo largo del río Paraguay, en la región Oriental y el acuífero Chaco Alto (TQca) en la región Occidental.

El acuífero Misiones (Jm) se presenta con una serie de ventajas: grandes volúmenes almacenados y la posibilidad de incremento de recarga, como consecuencia de una intensificación de la explotación del agua. Muy favorablemente ubicado en la región Oriental del Paraguay, el aumento de explotación, de este acuífero, ofrece una alternativa importante para el abastecimiento, donde el agua superficial no está prontamente disponible.

Los grandes volúmenes de renovación anual que recibe el acuífero Cuaternario (Q), a lo largo del río Paraguay, así como su importante capacidad de almacenamiento, tornan este acuífero como uno de los principales. Aunque, todavía es muy poco explotado y en escala ultrareducida por pozos someros, normalmente excavados, de poco caudal, su potencial en términos de caudales instantáneos es grande, lo que torna atractivo para uso de diversas finalidades.

Por ser, prácticamente, el único recurso hídrico disponible en la parte Noroeste de la región Occidental, el acuífero Chaco Alto (TQca), adquiere gran importancia. En los últimos años la actividad agropecuaria ha tenido un importante crecimiento en esta área, acompañado de una mayor utilización del agua subterránea, lo cual, parece ser, ha favorecido la recarga del acuífero, que se ve reflejado en el mejoramiento de las calidades químicas del agua, en los pozos ubicados a lo largo de la frontera Paraguay - Bolivia. Sin embargo, es necesario un estudio de detallamiento de este acuífero, para conocer su real potencial, lo que permitirá su explotación racional.

Otros acuíferos que merecen especial atención, por sus promisorios y alentadores potencialidades hidrogeológicas, son: Chaco Norte (Qcn), Agua Dulce (kad), Adrián Jara (Kaj) y Palmar de las Islas (Cpi), todos ubicados en el Norte de la región Occidental. Ante la ausencia, en esta área, de recursos hídricos superficiales

perenne,
hidrogeol
esa imp

Aunqu
agua s b
(Cco), s
pozos, m
veces r
explotar

Los
impresión
a volun
no debn
important
Patiño (C
ciertas é
disponibl
región c
mejorar
acuífero.

Argentina
Arc n
INCYT

Bolivia,

2 5 0

Brasil, D

1 5

Da Fran a

Noror

- (A

Gilboa,

of S

J.P d

Gobierno

de P

Des r

Godoy, E

Par g

del CI

Nacione

Sub st

New Yo

Mente, /

Nor' h

69 - t

Mero,

Eva'ua

Hydro

erían una

idental o
ca de la
fframente
nc'o, que
a magnitud
Boivia de
dr Darcy.

iridad de
cuifero
largo del
lt (TQca)

ventajas:
emento de
xplotación
en al del
ofrece una
el agua

l cuifero
importante
no de los
er escala
de poco
es grande,

posible en
ho Alto
actividad
sta área,
o cual,
ue se ve
gua, en
olivia.
de este
mirá su

or sus
s son:
Palmar de
c dental.
erficiales

perennes, se hace imperativo conocer las características hidrogeológicas de estos acuíferos, para impulsar el desarrollo de esa importante área.

Aunque, también grande con respecto a volúmenes disponibles de agua subterránea, los acuíferos Alto Paraná (Kap) y Coronel Oviedo (Cco), son menos atractivos desde el punto de vista de caudales de pozos, mientras que fracasos en perforaciones (pozos secos), y a veces problemas de calidad de agua, pueden interferir en su explotación.

Los otros acuíferos del país, a pesar de que no son tan impresionantes como los acuíferos principales, en lo que se refiere a volúmenes disponibles, caudales de pozos y volúmenes almacenados, no deben ser menospreciados, ya que algunos de ellos se tornan importantes debido a su ubicación geográfica, como los acuíferos Patiño (Kp) y Caacupé (Sc) en la región Oriental; o constituye en ciertas épocas del año (sequía), en el único recurso de agua dulce disponible, como es el caso del acuífero Chaco Central (TQcc) en la región Occidental, en el que la práctica de recarga artificial puede mejorar la calidad y aumentar el volumen de agua disponible de este acuífero.

BIBLIOGRAFIA

- Argentina, INCYTH (1986). Mapa Hidrogeológico de la República de Argentina, escala 1 : 5 000 000. Centro de Hidrología Aplicada - INCYTH. Ezeiza.
- Bolivia, GEOBOL (1985). Mapa Hidrogeológico de Bolivia, escala 1 : 2 500 000. Departamento de Geología Aplicada-GEOBOL. La Paz.
- Brasil, DNPM (1983). Mapa Hidrogeológico do Brasil, escala 1 : 5 000 000. Convênio DNPM - CPRM. Recife.
- Da Franca R. dos Anjos, Nelson (1972). Hidrogeología de la Región Nororiental del Paraguay. Organización de los Estados Americanos - OEA. Proyecto Aquidabán. Asunción.
- Gilboa, Y., Mero, F. and Mariano, I.B. (1976). The Botucatu Aquifer of South America. Model of an Untapped Continental Aquifer. J.Hydrol. 29, 165 - 179.
- Gobierno del Paraguay / Naciones Unidas (1986). Mapa Hidrogeológico de Paraguay, escala 1 : 1 000 000. Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado del Chaco - MDN. Asunción.
- Godoy, E. (1986). Reconocimiento Hidrogeológico del Norte del Chaco Paraguayo. Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado del Chaco - MDN. Asunción.
- Naciones Unidas (1978). Investigación y Desarrollo de Agua Subterránea en el Chaco. Informe Técnico. UNPD - Naciones Unidas New York.
- Mente, A. (1973). Groundwater Investigations in Central and Northwestern Chaco Boreal of Paraguay. UNDP - MDN, Project PAR - 69 - 516. Filadelfia - Paraguay.
- Mero, F. and Gilboa, Y. (1974). A Methodology for the Rapid Evaluation of Groundwater Resources, Sao Paulo State, Brazil. Hydrol. Sci. Bull. 19, nº3, 347 - 358.

Tabela I

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS E HIDROQUÍMICA DOS AQUÍFEROS

Idade	Aquífero	Litologia	Nº de Poços	Prof. Poços m		Vazão m³/h		Cap. Espec. m³/h/m		K	T	Res. Seco mg/l
				Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.			
Q	Quaternário	Areia, silte, argila, etc.	—	4	20	1	5	—	—	—	—	77
TQ	Chaco Alto	Areia fina, silte arenoso ou argil.	98	57	308	0,5	45	0,2	3,7	2,6	55	219-4115
TQ	Chaco Central	Areia fina (paleocauces)	121	8	52	0,1	24	0,3	5	—	—	139-5915
K	Alto Paraná	Basalto	35	19	399	0,5	96	0,003	9,3	—	—	92
K	Patiño	Arenito fina a média	158	30	250	1,2	72	0,04	3,3	0,4	26,1	33
J	Misiones	Arenito quartzoso, fina a média	39	32	200	1,8	80	0,2	4,3	1,7	38,7	24
P	Independência	Arenito, siltito, folhelho	47	45	196	2,5	40	0,07	1,8	0,3	16,1	—
C	Cnel. Oviedo	Siltito, arenito, folhelho	25	42	146	1,2	25	0,06	1,7	0,5	12,4	—
S	Caacupé	Arenito quartzoso, conglomerado	55	20	318	0,8	90	0,03	3	—	—	81
PE	Emb. Cristalino	Granito, gnaisse, quartzito, xisto	7	33	265	0,4	7	0,002	4	—	—	—

Tabela II

RECARGA ESTIMADA DOS AQUÍFEROS

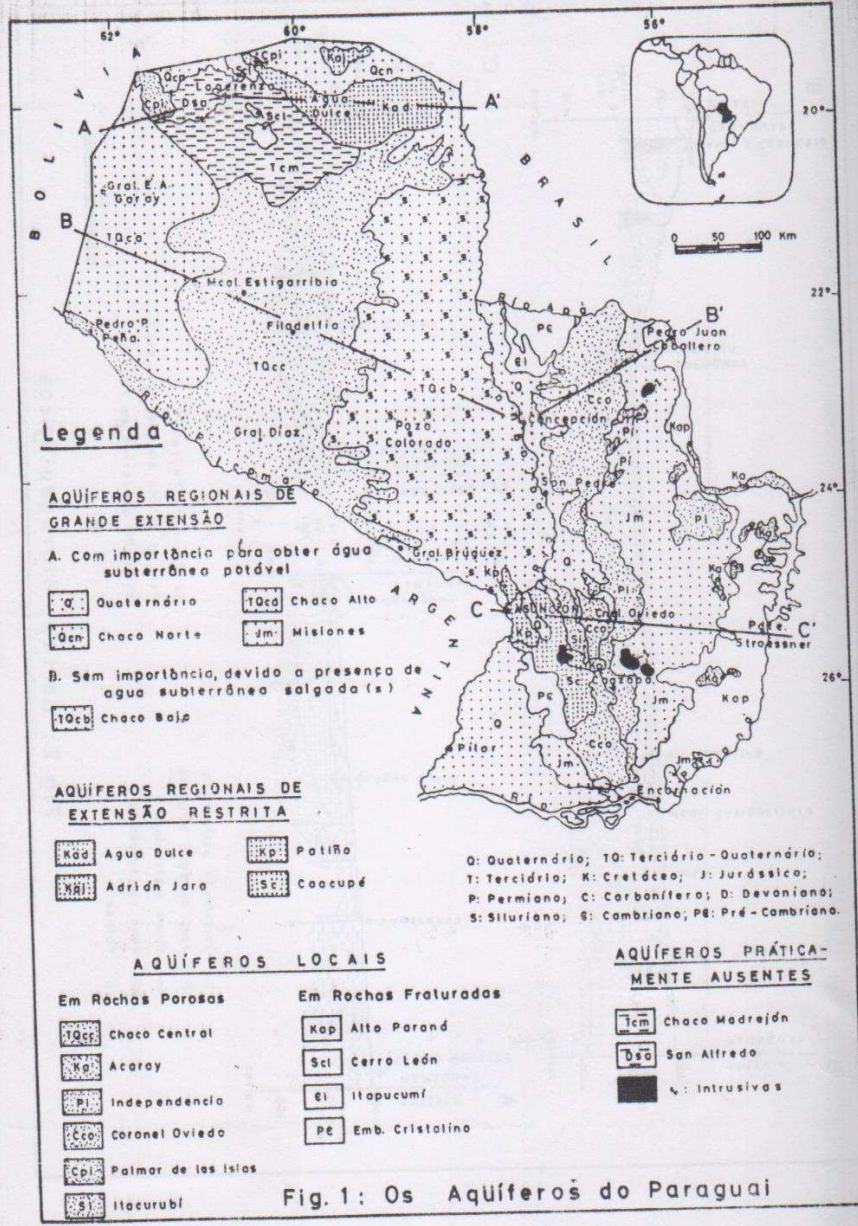
Aquífero	Espessura m	Área Km²	Precipitação mm/ano	Infiltração (1) %	Recarga total x 10 ⁶ m³/ano
Quaternário (Q)	1-10	47 863	1300	3-5	1866-3111
Chaco Alto (TQca)	400-600	42 970	—	—	76-114 (2)
Chaco Central (TQcc)	1-36	85 530	800	(2-4)	13,7-27,4 (3)
Alto Paraná (Kap)	600-700	27 340	1700	1,2-3,8	547-1777
Patiño (Kp)	—	2 010	1400	1-2	28-56
Misiones (Jm)	200-300	37 395	1600	1-2	560-1197
Independência (Pi)	700	13 768	1600	1,5-4	330-881
Coronel Oviedo (Cco)	600	15 628	1450	1,5-4	343-306
Itacurubí (Si)	150	930	1450	1,5-4	20-54
Caacupé (Ca)	300	1395	1450	1,5-4,5	30-91
Emb. Cristalino (PE)	—	7 603	1500	1,5-4,5	175-517

(1) Módulo de recarga; estimada entre parênteses. (2) Calculado como fluxo de água subterrânea; $Q = W \times K \times b \times l \times t$. (3) Calculado com 1% da área total.

B O L I
 B
 Legenda
 AQUÍFERO
 GRA...
 A. C...
 B. S...
 AQUÍFERO
 EX...
 Em P...
 C...
 C...
 C...
 C...

Seco	g/l
77	
215-4115	
5915	
92	
33	
24	
81	

Recarga total	l/ano
36-3111	
76-114 (2)	
1,7-27,4 (3)	
47-1777	
28-56	
60-1197	
30-881	
43-906	
26-54	
3-91	
75-517	
taxo de	
at.	



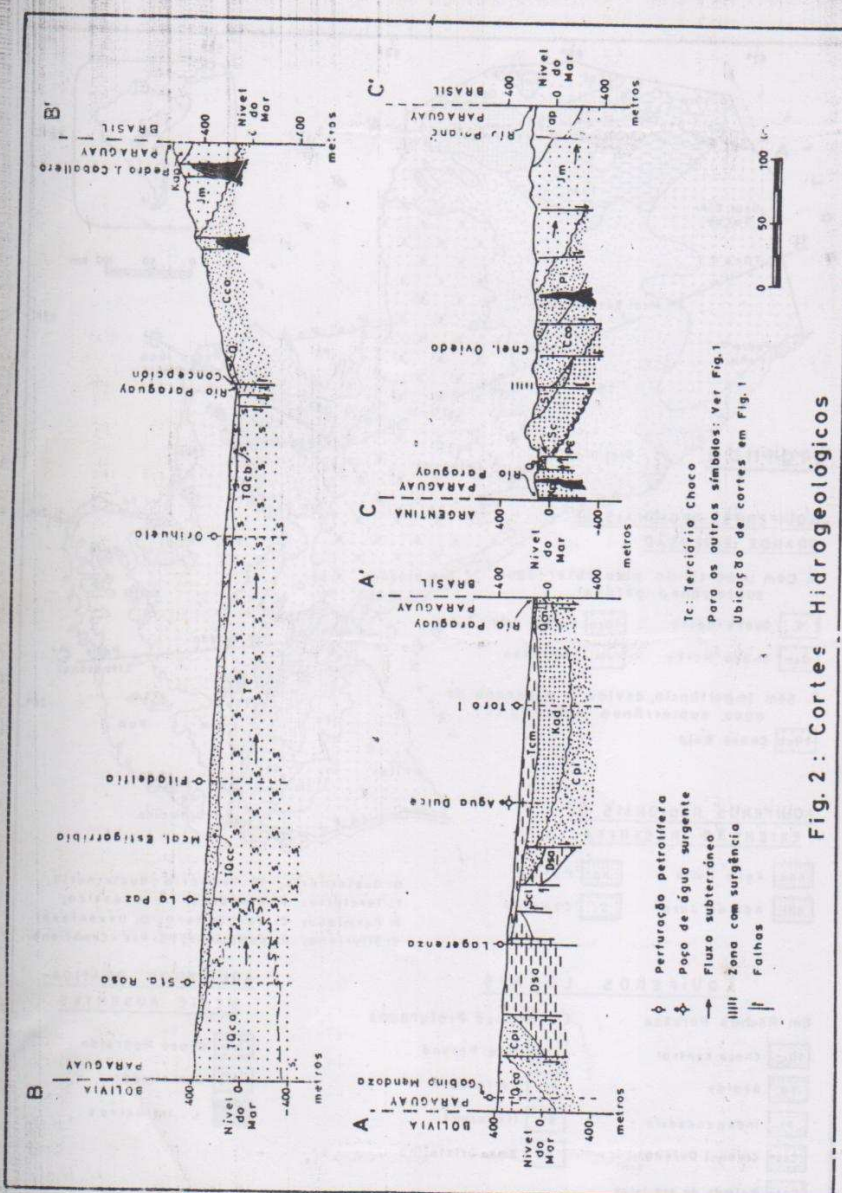


Fig. 2 : Cortes Hidrogeológicos