ORSTOM Documentation
020017188

ORSTOM - BOLIVIE
DOCUMENTATION

1994

LAS ROCAS MADRE DE BOLIVIA Y SU POTENCIAL PETROLIFERO
SUBANDINO - MADRE DE DIOS - CHACO

I. MORETTI[1,2], E. DIAZ MARTINEZ[1], G. MONTEMURRO[3], E. AGUILERA[4] & M. PEREZ[4]

[1]Convenio YPFB-ORSTOM, Casilla Postal 4875 – Santa Cruz, Bolivia
[2] IFP, BP 311, 92506 Rueil Malmaison, France
[3] YPFB, Casilla Postal 1659, Santa Cruz, [4] CTP-YPFB, Casilla 727 – Santa Cruz, Bolivia

RESUMEN

Un estudio completo de los datos geoquímicos de las rocas madre de las cuencas orientales de Bolivia (Subandino - Chaco - Madre de Dios) ha sido realizado a fin de definir el potencial petrolífero de la zona. Los datos se encuentran ahora reunidos en una base de datos y este artículo presenta la síntesis de los resultados. Además de las clásicas rocas madre del Devónico medio (formaciones Tequeje en el norte, Limoncito en el centro y Los Monos en el sur), otras han sido definidas: el Devónico superior en el norte del país (Formación Tomachi) y la Formación Copacabana, de edad Carbonífero superior a Pérmico inferior, en el Subandino norte; las dos presentan un excelente potencial. El Cretácico terminal (formaciones Flora en el Subandino norte y El Molino en el Altiplano) también tiene un potencial algunas veces alto, pero su espesor es muy reducido. Casi todas las rocas madre maduraron durante el Neógeno debido a la sedimentación en el antepaís y en las cuencas tipo *piggyback*, y por lo tanto participan en el sistema petrolero actual. El Silúrico y el Paleozoico inferior presentan igualmente niveles de lutitas potentes, pero en toda la parte sur el Silúrico maduró durante el Paleozoico superior debido al gran espesor de Devónico. Las diferentes cuencas son comparadas en función de su potencial (SPI), indicando que las dos zonas más interesantes son el Subandino norte y Madre de Dios, donde ese parámetro sobrepasa 15 t/m². Como estas dos áreas han sido menos exploradas hasta ahora, los resultados de este estudio permiten ser optimistas sobre las posibilidades para el futuro.

ABSTRACT

A complete study of source-rock geochemical data has been carried out for the Bolivian foothills and foreland (Sub Andean Zone, Chaco and Madre de Dios) in order to quantify the petroleum potential of the area. Overall available data has been compiled in a data base, and a synthesis of the results is presented here. Besides the classical mid-Devonian source rocks (Tequeje Fm. in the north, Limoncito Fm. in the center and Los Monos Fm. in the south), other ones may be as well as important: the Tomachi Fm. (late Devonian) in the north of the country and the Copacabana Fm. (late Carboniferous-early Permian) in the northern Sub Andean zone. Both present an excellent potential with S2 up to 40 mg HC/g and average values larger than 10 mg HC/g on few hundred meters. The Latest Cretaceous (Flora Fm. in the northern Sub Andean zone) also present locally a high potential but has almost no influence, its thickness being quite reduced. Almost all the source rocks matured during the Neogene due to the subsidence in the andean foreland and, locally, in the piggyback basins, and are thus involved on the current petroleum system. Silurian and lower Paleozoic units also present thick shale beds, but these source rocks were mature before the Jurassic in most of the country, except on the Boomerang, where the Silurian is nowadays overmature and may play an important role. The different zones are compared based on their Source Potential Index which indicates that the richest areas are the northern Sub Andean Zone and the Madre de Dios basin with SPI over than 10 t/m². Since these two areas remained almost unexplored and, at least for the northern Sub Andean zone, present very large structures, these results allow to be optimistic about the possibilities for future exploration.

INTRODUCCION

Este trabajo presenta una síntesis de los datos de geoquímica que se encuentran en YPFB y que han sido recopilados en una base de datos durante los años de 1994 y 1995, sobre todo en referencia a las cuencas subandinas, de Madre de Dios y del Chaco (los resultados sobre el Altiplano se presentan en Moretti & Aranibar en este volumen). La base de datos tiene actualmente alrededor de 3000 valores de análisis de pirólisis que fueron utilizados para definir los mapas. Estos datos se han tomado de más de 100 informes internos de estudios de tipo regional e informes finales de pozos, algunos de ellos realizados bajo convenios con diversas compañías e instituciones que trabajan en Bolivia. La procedencia y características de cada uno de los datos pueden encontrarse consultando la base de datos, en la que se especifica de qué cuenca proceden, y si se trata de datos de superficie o de pozo.

REVISTA TECNICA DE YPFB, 15 (3-4) : 293 - 317, DICIEMBRE 1994 , COCHABAMBA, BOLIVIA

Fonds Documentaire IRD
Cote : Bx23212 Ex 1
Fonds Documentaire IRD
010023212

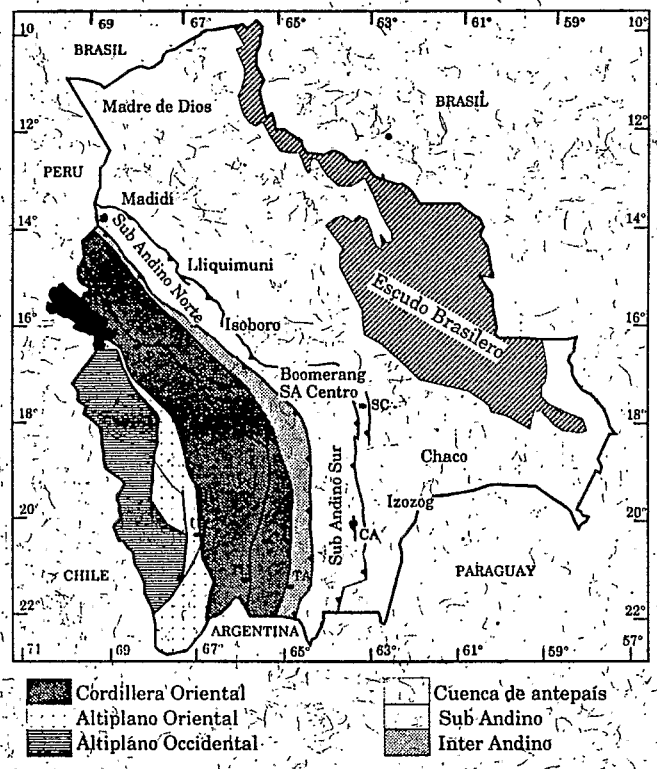


Fig. 1.– Mapa tectónico simplificado de Bolivia mostrando la ubicación de la zona subandina. En la parte central, la zona subandina de Bolivia forma el Codo de Santa Cruz, caracterizado por la importante zona de transferencia de Boomerang-Chapare. En la parte norte y centro, la propagación del frente orogénico estuvo condicionada por el borde norte de la cuña sedimentaria paleozoica. SC, Santa Cruz; CFP, Cabalgamiento Frontal Principal; B-C.T.Z., zona de transferencia de Boomerang-Chapare.

Fig 1: Simplified tectonic map of Bolivia showing the location of the Sub Andean region. In the central part, the Santa Cruz Elbow is characterized by the Boomerang-Chapare transfer zone. In the northern and central part, the propagation of the deformation front was limited by the northern border of the Paleozoic sedimentary wedge. SC, Santa Cruz; CFP, Main Frontal Thrust; B-C.T.Z., Boomerang-Chapare Transfer Zone.

En Bolivia, la principal roca madre la constituyen las lutitas del Paleozoico, con mayor o menor riqueza según las zonas, y algunos niveles del Maastrichtiano, aunque entre estos dos grupos de rocas madre hay claras diferencias en cuanto a extensión y potencial. Es importante definir la evolución de la región durante el Paleozoico para poder comprender la repartición de las facies ricas en materia orgánica. Por lo tanto, se realizará una discusión del estilo de sedimentación en la cuenca silúrico-devónica, siempre en función del estado actual de conocimientos, que todavía es parcial. Después de la descripción de cada roca madre y de su potencial, se discutirá el potencial de cada zona en relación con su nivel actual de exploración.

Como ocurre en muchas áreas compresionales, tales como la zona subandina de Bolivia, el potencial de hidrocarburos de cada trampa depende de las relaciones entre la estructuración y la maduración. Por lo tanto, el análisis de los sistemas petrolíferos requiere estudios de geología, de cinemática del emplazamiento de los corrimientos, y de cinética de la maduración de las rocas madre involucradas. Este tipo de estudios ya han sido publicados como parte de los resultados del convenio YPFB-ORSTOM (Baby *et al.*, 1994b; Moretti *et al.*, 1995). Este nuevo trabajo es mucho más completo en cuanto a la geoquímica, y las conclusiones son por lo tanto más precisas, aunque no se tratará el tema de la maduración y migración de los hidrocarburos.

ESTADO DE LA EXPLORACION

La exploración petrolera en Bolivia se ha hecho sobre todo en la zona subandina centro y sur, donde las trampas son numerosas debido a la estructuración compresiva terciaria relacionada con la formación de los Andes. El Subandino sur está bastante explorado (350 pozos) y ha producido alrededor de 160 MMBBL, correspondiendo gran parte a los bloques de Camiri y Grigotá. En el Boomerang se han perforado 59 pozos exploratorios y la producción acumulada actual es de10 MBBL y 65.717 MMPC de gas. En cambio, el área del Chaco (cuenca de antepaís actual) ha sido poco explorada, tanto sobre el Alto de Izozog (12 pozos en los años 60), como en la llanura (5 pozos en la zona Otuquis, Ravelo, Tucavaca) y los resultados obtenidos han sido negativos. En el Subandino norte, la exploración empezó en los años 60 con los pozos Tuichi y Boya, posteriormente se continuó en los años 90 con las perforaciones de Lliquimuni y Tacuaral, y está continuando actualmente después de obtener resultados muy positivos sobre el potencial de la zona. A pesar de todo, la perforación de pozos en esta zona es difícil, y los dos primeros pozos no llegaron hasta el objetivo. En la cuenca Madre de Dios la exploración ha sido muy activa durante los últimos años. Esta zona no está tan afectada por la compresión como en el Subandino, y por lo tanto es más difícil definir trampas estructurales. Existen abundantes datos de pozo que indican la presencia de hidrocarburos, aunque hasta el momento no se han podido identificar acumulaciones de importancia económica.

MARCO ESTRUCTURAL

El Subandino de Bolivia es una compleja faja plegada y corrida (Roeder, 1988; Sheffels, 1990; Baby *et al.*, 1989, 1992, 1993), que constituye el márgen oriental del dominio Andino Central (Fig.1). Su límite occidental es el Cabalgamiento Frontal Principal (CFP), existiendo una transición estructural entre Subandino y Llanura (Beni y Chaco) hacia el este. La deformación se inició en el Oligoceno superior y todavía continúa. El material involucrado en esta deformación es de edad Ordovícico a Cretácico, con un relleno de antefosa (*foredeep*) de edad Oligoceno tardío-Reciente. La serie sedimentaria preorogénica muestra variaciones de facies y de espesores (Fig. 2), las cuáles juegan un importante papel en el control de la geometría (Baby *et al.*, 1994a y b). En su parte central (entre 16 y 17°S) la faja deformada forma un codo, y está caracterizada por una importante zona de transferencia. De norte a

sur, la geometría estructural del Subandino muestra variaciones en la cantidad y dirección de acortamiento. Se reconocen tres zonas estructurales: el Subandino norte entre 13-17°S, con dirección noroeste-sudeste, la parte central entre 17-18°, con una orientación oeste-este, y el Subandino sur entre 18-22°S, con una dirección predominante norte-sur, que fueron interpretadas en función de la existencia o no de niveles de despegue (Baby *et al.*,1994). En terminos de geoquímica, las zonas que se podrían definir en Bolivia son un poco diferentes de las zonas estructurales, porque están condicionadas por la geometría de las cuencas paleozoica y cretácica, anteriores a la deformación andina.

ESTRATIGRAFIA

Debido a los importantes cambios laterales de facies, se han introducido un gran número de nombres de unidades litoestratigráficas en la literatura. A pesar de todo, la serie estratigráfica ha sido revisada y publicada bajo el convenio YPFB - ORSTOM en 1990-1992 (Sempere, 1990b; Oller, 1992). En este trabajo se utiliza este cuadro estratigráfico para las edades de las formaciones. La figura 2 muestra las columnas estratigráficas tipo, definidas para el Subandino norte, centro-y sur. Conviene resaltar la presencia de dos discordancias bien marcadas situadas en la base de las secuencias jurásica y oligocena, que están asociadas con erosión parcial de las unidades inferiores.

Subandino Norte y Madre de Dios

La sucesión paleozoica se encuentra casi completa, y abarca desde el Ordovícico hasta el Pérmico. Sobre esta secuencia yacen en discordancia las areniscas mesozoicas de la Formación Beu, con un espesor que llega hasta los 800 m. Las secuencias ordovícica, devónica, carbonífera y pérmica disminuyen de espesor hacia el nordeste, mientras que la secuencia silúrica sólo está presente en la zona central y sureste del Subandino norte. Hacia el tope de esta columna preorogénica se encuentran los depósitos de antepaís continental terciario con espesores de hasta 5000 m.

El principal nivel de despegue de los cabalgamientos en el Subandino norte lo constituyen las lutitas del Ordovícico superior, y por lo tanto las unidades anteriores no están implicadas en los cabalgamientos, sino que constituyen el basamento autóctono, que sólo aflora en la Cordillera Oriental. La extensión del Silúrico todavía no se conoce con exactitud (Fig 3), aunque parece alcanzar localmente hasta el norte (como en el pozo Pando X1, en el tramo 1932-1935m donde se observan elementos que indican una edad Pridoliano). En el Subandino norte, por encima de los niveles predominantemente arenosos del Ordovícico superior (cuando el Silúrico no se ha depositado) se encuentra una secuencia de edad Devónico y Carbonífero inferior (formaciones Tequeje, Tomachi y Retama), con niveles lutíticos que en ocasiones también actúan como niveles de despegue, y entre las que existen intercalaciones a veces importantes de areniscas que podrían ser reservorios, como ocurre en el Subandino centro y sur. La presencia de diamictitas y niveles deslizados (*slumps*) y resedimentados dentro del Devónico superior (Struniano) y Carbonífero inferior es frecuente en todo Bolivia, y en ocasiones ha originado en el pasado problemas en la definición de edades y límites de unidades. En general, se debe considerar el límite entre unidades con criterios litológicos (predominio de litologías como diamictitas, conglomerados), y el límite de edad Devónico-Carbonífero según los datos disponibles de palinología. Por ejemplo, según este criterio, en el pozo Pando X1 el límite litológico (Tomachi-Retama) se sitúa a 1241 m, y el límite de edades (Devónico-Carbonífero) a 1137 m, por lo que la parte basal del Grupo Retama esta datada como Fameniano. La secuencia del Paleozoico superior (y Triásico?) se inicia en el Carbonífero superior, después de un periodo erosivo durante el Carbonífero medio (Namuriano), con la Formación Yaurichambi. Esta unidad inicia un ciclo transgresivo de tipo mixto siliciclástico-carbonatado (formaciones Copacabana y Bopi), con presencia de calizas y dolomías, areniscas eólicas, y lutitas y margas.

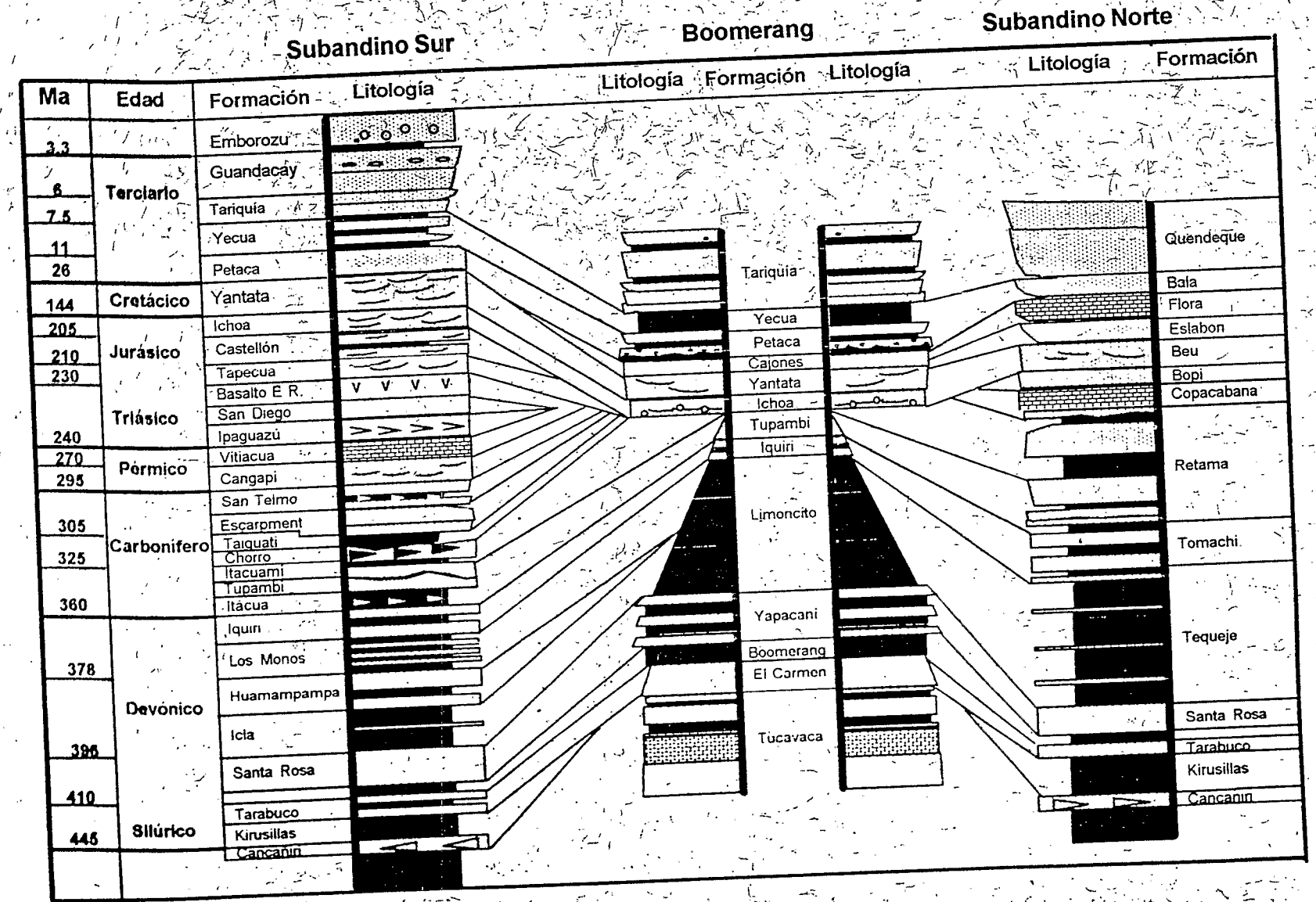
Por encima de una marcada discontinuidad erosiva se sitúan las areniscas eólicas de la Formación Beu, de edad posiblemente jurásica, y sobre estas un conjunto heterolítico siliciclástico-carbonatado del Cretácico terminal (formaciones Eslabón y Flora), también posterior a un periodo erosivo de edad Jurásico superior a Cretácico medio (Sempere, 1990; Oller & Sempere, 1990). Otra discontinuidad erosiva de edad paleógena limita las secuencias mesozoicas de una potente serie neógena continental siliciclástica (formaciones Bala, Quendeque, Charqui, Tutumo) que rellenan la cuenca de antepaís y cuencas de *piggy-back* en el Subandino norte. Estas subcuencas de *piggy-back* pueden llegar a ser muy profundas, como es el caso del sinclinal de Lliquimuni-Bella Vista, que alcanza más de 6000 m de espesor de sedimentos neógenos. El registro del comienzo de la deformación de la Cordillera Oriental (Formación Bala) no es muy potente (unos 200 m), mientras que la tasa de sedimentación aumenta drásticamente en el Mioceno superior con las formaciones Quendeque (>1500m) y Charqui (>2500m). En la zona de Madre de Dios, falta la parte superior de la serie terciaria, y aflora la Formación Quendeque.

Subandino Centro y Boomerang

La columna estratigráfica preorogénica se caracteriza por una cuña sedimentaria paleozoica continua (Fig. 2) de edad ordovícica a carbonífera, que se acuña hacia el norte sobre el basamento Precámbrico-Cámbrico del escudo brasileño, y está cubierta en discontinuidad erosiva por unos 500 m de rocas sedimentarias mesozoicas y más de 1600 m de depósitos del Oligoceno Superior a Reciente. La principal característica de esta zona la consituye el acuñamiento de la serie paleozoica, que condicionó la propagación de los cabalgamientos durante la compresión, al estar limitada por la presencia de los niveles de despegue en la serie estratigráfica (Baby *et al.*, 1993, 1994a y 1994b).

La presencia de un basamento autóctono de edad Proterozoico Superior está comprobada tanto por afloramientos en la zona del Chapare, como por datos de pozo. Estas rocas están afectadas por la deformación compresiva brasiliana de edad cámbrica

CORRELACION ESTRATIGRAFICA



(Bloomfield & Litherland, 1979). La secuencia paleozoica en la zona sur presenta una serie similar a la del Subandino norte, caracterizada igualmente por depósitos marinos siliciclásticos, pero con un mayor espesor para los depósitos silúricos (Formación El Carmen), que no se encuentran tan desarrollados hacia el norte de Bolivia. El Devónico se inicia con las lutitas de la Fm. Boomerang, seguidas por las areniscas de la Formación Roboré, también llamada Fm. Yapacaní cuando contiene lutitas. Este Devónico inferior está presente a lo largo del margen NE de la cuenca del Chaco y es equivalente de la Formación Santa Rosa del Subandino sur. Por encima, las formaciones Limoncito e Iquiri presentan un considerable espesor (más de 1600 m en el pozo San Juán-X2), con predominio de lutitas. En el Devónico superior (Fameniano medio-superior) comienza una sedimentación de tipo [illegible] y resedimentado (diamictitas y frecuentes estructuras de deformación sinsedimentaria) que se mantiene durante el Carbonífero inferior y medio (grupos Machareti y Mandiyuti), aunque con espesores más reducidos que en el Subandino sur, y menos lutitas que en el Subandino norte. Todas estas unidades paleozoicas se acuñan (*toplap*) de forma muy marcada hacia el norte y este, de tal forma que sólo una mínima parte del Paleozoico superior se encuentra preservada bajo la discontinuidad erosiva de la base del mesozoico. Estas unidades (formaciones Cangapi y Copacabana) afloran con mayor desarrollo en el Subandino centro.

Por encima de la discontinuidad erosiva se encuentran las areniscas eólicas y fluviales de las formaciones Ichoa y Yantata, de edad jurásica, separadas de depósitos igualmente arenosos del Cretácico terminal (Formación Cajones). A continuación se encuentra la misma discontinuidad algo erosiva que hemos descrito para el Subandino norte, indicadora del comienzo de la deformación del frente subandino, y que resulta en la depositación de las formaciones Petaca (Oligoceno superior-Mioceno medio), Y[illegible] (Mioceno superior) y Chaco (Mioceno terminal-Reciente), de carácter continental. Estas unidades son mucho menos potentes que en el Subandino norte (algo más de 2000 m en el pozo San Juán-X2, situado en el borde de la llanura del Boomerang).

Subandino Sur y Chaco

Esta zona presenta la serie fanerozoica más completa, desde el Proterozoico superior hasta el Terciario y Cuaternario, con las mismas discontinuidades erosivas que se han mencionado para el Subandino norte y centro. La erosión anterior al Jurásico es menor, y ha permitido la preservación de unidades pérmicas y triásicas. Las rocas del Paleozoico inferior y Proterozoico afloran en el extremo sur de la Cordillera Oriental y en el borde norte y este de la cuenca del Chaco. La secuencia silúrico-devónica en esta zona es muy potente (un total de más de 4000 m), con importantes espesores de lutitas (especialmente dentro de las formaciones Kirusillas, Icla y Los Monos) alternando con areniscas (formaciones Santa Rosa, Huamampampa e Iquiri), algunas de las cuales constituyen reservorios comprobados. Todos estos sedimentos siliciclásticos se depositaron en un ambiente marino somero dominado por el oleaje y las tormentas en un marco tectónico de antepaís (Montemurro, 1994; Sempere, 1995). De igual forma que en el Subandino norte y centro, el Devónico terminal está caracterizado por el comienzo de depósitos arenosos y resedimentados con evidencias de glaciación, que continúan hasta el Carbonífero medio (grupos Machareti y Mandiyuti). En estos depósitos se observan claramente geometrías de canales, tanto en superficie como en perfiles sísmicos. Del Carbonífero superior al Triásico se suceden varias unidades arenosas (formaciones Cangapi) y carbonáticas (formaciones Copacabana y Vitiacua) que registran sucesivas transgresiones y regresiones marinas. Algunas de las capas de areniscas del Paleozoico superior constituyen reservorios en el sur del país. Localmente se encuentra una capa de basalto que permite datar el final de esta secuencia como Triásico medio (Soler & Sempere, 1993). El basalto de Entre Ríos se ha interpretado como resultado de un proceso de *rifting* que habría sido la causa de la erosión pre-jurásica observada en todo el Subandino. La sedimentación mesozoica es principalmente arenosa (formaciones Tapecua, Castellón e Ichoa) y de edad Triásico medio y Jurásico. En el norte del Subandino sur y Chaco (área de Santa Cruz) también se observan las areniscas y calizas continentales de la Formación Cajones, de edad Cretácico terminal. De igual forma que más al norte, la sedimentación terciaria tiene lugar en el Neógeno (Oligoceno superior a Reciente) con la sedimentación de

Fig. 2.- (a) Columna estratigráfica esquemática para el Subandino Norte y Madre de Dios, mostrando las dos principales discontinuidades erosivas, una en el Triásico (≈205 Ma) y otra en el Oligoceno superior (27 Ma). Esta última marca el comienzo de la deformación andina. La primera se explica como resultado de un episodio distensivo del Triásico medio relacionado con el comienzo de la ruptura del Gondwana. Obsérvese la presencia de un hiatus en el Cretácico (144-68 Ma) y otro en el Paleoceno (53-27 Ma). (b) Cuña sedimentaria de las zonas del Boomerang y del Subandino Centro. Existen también en esta zona dos discontinuidades erosivas (Triásico y Eoceno tardío) y dos hiatus (Cretácico y Paleoceno). (c) Columna estratigráfica esquemática para el Subandino Sur y Chaco. El hiatus del Triásico es mucho menos fuerte. BER = Basalto de Entre Rios, datado en 233 Ma (Soler & Sempere, 1993).

Fig 2: *(a) Simplified stratigraphic column for the Northern Sub Andean and Madre de Dios, displaying the two main erosive discontinuities, of Triassic (≈205 Ma) and Late Oligocene (27 Ma) age. The latter marks the beginning of Andean deformation. The former is explained as the result of a Mid-Triassic extensional episode related with the beginning of Gondwana breakup. Note the hiatus within the Cretaceous (144-68 Ma) and another one within the Paleocene (53-27 Ma). (b) Sedimentary wedge of the Central Sub Andean and Boomerang areas. Two erosive discontinuities (Triassic and latest Eocene) and two hiatus (Cretaceous and Paleocene) are also present. (c) Simplified stratigraphic column for the Southern Sub Andean and Chaco. The Triassic hiatus is much less pronounced. BER = Entre Rios Basalt, dated as 233 Ma (Soler & Sempere, 1993).*

importantes espesores (hasta 4000 m) de depósitos continentales (formaciones Petaca, Yecua, Tariquía, Guandacay y Emborozú). La compresión afectó a esta zona a partir del Mioceno medio, en que se forman los cabalgamientos con un nivel de despegue principal en la Formación Kirusillas, y otros niveles de despegue menores, localizados principalmente en la Formación Los Monos, mediante los cuales se desarrollan *duplexes*.

PALEOGEOGRAFIA

Los resultados obtenidos durante los últimos años sobre la estratigrafía y evolución paleogeográfica y geodinámica de las cuencas paleozoicas de Bolivia (Semperé, 1990, 1995; Montemurro, 1994; Isaacson & Díaz, 1995) permiten definir de forma general la geometría de estas cuencas y la distribución de ambientes sedimentarios, sobre todo en cuanto a las relaciones proximal-distal (Fig. 3). Estos dos aspectos condicionan la presencia de lutitas y la riqueza en materia orgánica, y por lo tanto influyen de forma determinante en el potencial petrolero de las rocas madre. Las rocas paleozoicas del Ordovícico al Devónico de Bolivia se depositaron en una misma cuenca que cubría toda la zona occidental y central del país, incluidas las zonas de Madre de Dios, Subandino y Chaco. La geometría de la cuenca era alargada en dirección NO-SE, limitada al SO por un margen activo con abundantes aportes clásticos, y al NE por un margen cratónico relativamente estable, con menos aportes. De esta forma, el mayor desarrollo de espesores de lutitas, así como la presencia de ambientes anóxicos que permitieron la preservación de la materia orgánica, se encuentra a lo largo del eje de la cuenca y hacia su borde NE. Sobre este borde se ha podido establecer la presencia de ambientes deltaicos e interdeltaicos, sobre todo en las areniscas de las formaciones El Carmen y Roboré.

A partir del Devónico superior y hasta el Carbonífero medio se produce un levantamiento de la zona de la Cordillera Oriental y borde sur de la cuenca, con erosión y sedimentación sintectónica que origina importantes aportes clásticos a las cuencas orientales. Para este periodo se mantiene en general la posición del eje NO-SE de la cuenca, aunque con inmersión hacia el NW, que dá como resultado la orientación de los canales hacia el noroeste en la zona sur (Subandino y Chaco), y la ubicación de las facies más distales y ricas en materia orgánica en la zona del Boomerang durante el Devónico inferior y después al norte (Subandino norte y Madre de Dios) durante el Devónico superior. A partir del Carbonífero medio tiene lugar una transgresión marina que avanza progresivamente desde el NO hacia el sur, condicionada en parte por la anterior geometría y zona de máxima subsidencia, y que origina la presencia de lutitas ricas en materia orgánica en el Subandino norte, que constituye la zona axial de la cuenca que se prolongaría hacia el Perú.

Aparte de los condicionantes paleogeográficos (geometría de la cuenca, relación proximal-distal, etc.), los factores principales que resultaron en la distribución actual de las rocas madre paleozoicas son la erosión mesozoica y la deformación andina. La erosión mesozoica afectó a las unidades superiores, principalmente Carbonífero y Pérmico, y a las zonas de borde de cuenca, sobre todo hacia el borde cratónico, resultando en superficies de *toplap* con acuñamientos de la serie paleozoica (Alto de Madidi, zona del Boomerang,..). Más recientemente, la erosión oligocena ha eliminado el Cretácico terminal en una gran parte del país. La deformación andina originó la estructuración del frente de deformación del subandino, con importantes acortamientos que afectaron de forma drástica a la geometría de la cuenca paleozoica y la distribución de las rocas madre.

ROCA MADRE

Para la mejor descripción de las diferentes rocas madre, se ha utilizado la base de datos de YPFB, con todas las muestras recolectadas en afloramientos y recortes de pozo. Los datos se muestran en mapas (figuras 4 a 8) y gráficamente (S2 *versus* COT e Indice de Hidrógeno *versus* Indice de Oxígeno) para cada zona.

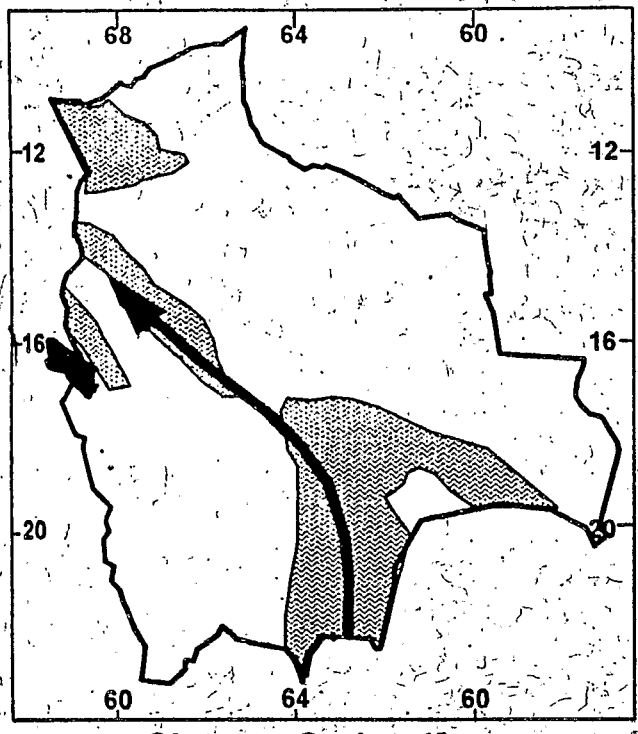
Ordovícico

El Ordovícico aflora en toda la Cordillera Oriental, pero no en el Subandino. Los pocos datos de rocas madre de esta edad vienen de la Cordillera Oriental y del Altiplano. Todos los datos tienen un S2 residual nulo, pero el COT puede ser todavía bueno. Los mejores datos de COT provienen de Lequepalca (3.13%), del río Pilpintu (2.44%, Subandino centro) y de Yura, en la zona de Potosí (1.7%). Posiblemente, al oeste del Altiplano, donde la presencia de Devónico y Silúrico no está comprobada, el Ordovícico ha podido permanecer inmaduro hasta el Terciario y tener una influencia sobre el sistema petrolero actual. En el Subandino, debido al espesor de la cuenca silúrico-devónica, el Ordovícico estaba maduro antes del fin del Paleozoico, y como la estructuración del Subandino es terciaria, su potencial como roca madre no tiene influencia sobre las acumulaciones actuales y por lo tanto no será tratado aquí.

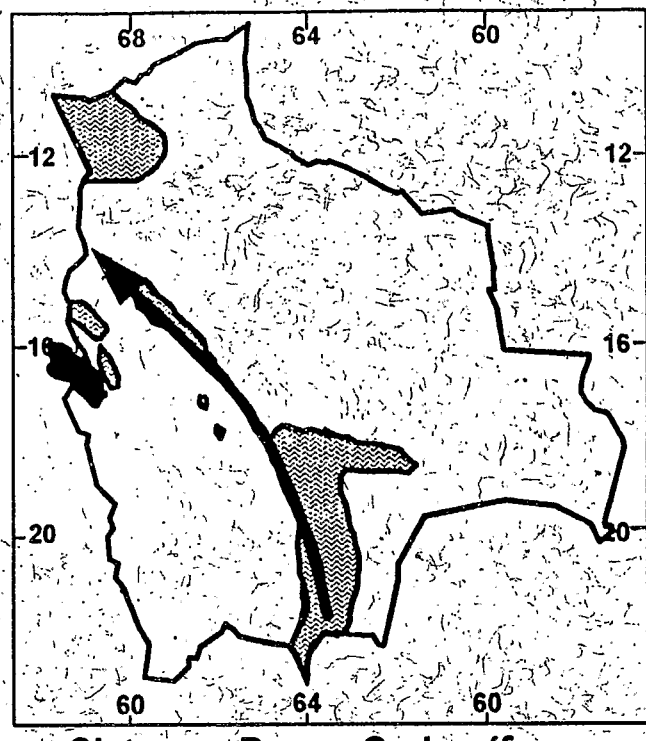
Silúrico

La roca madre del Silúrico es la Formación Kirusillas, de ambiente de plataforma marina siliciclástica poco profunda. El Silúrico superior se conoce en pozos y superficie en el Subandino sur, Cuenca del Chaco, Subandino centro, así como en una pequeña zona al sur del Subandino Norte, tal como se muestra en las Figs. 3 y 4. Recientemente fué probado que se extiende más al norte y fue encuentrado en el pozo Pando en el tramo 1932-1937 metros, pero no tiene más que algunos metros de potencia. El espesor del Silúrico aumenta de norte a sur, alcanzando hasta 1500 m de potencia. Su potencial se conoce por los pozos del Boomerang y los afloramientos de la Cordillera Oriental. Las muestras disponibles que permiten una evaluación del potencial se pueden ver en la figura 4. En el pozo El Pintao, por ejemplo, el COT tiene una valor promedio de 2 % y el S2 de 5 mg HC/g. En pozos, los valores más altos se encontraron en el pozo de Santa Rosa-W-X7, donde el COT llega hasta 3,1% y el S2 hasta 13.7 mg HC/g (Fm. El Carmen). Muchas veces, la perforación de los pozos suele parar unos metros después de entrar al Silúrico, así que el espesor de la roca madre no es conocido. En el afloramiento, los mejores valores vienen también de esta zona (Chimoré,

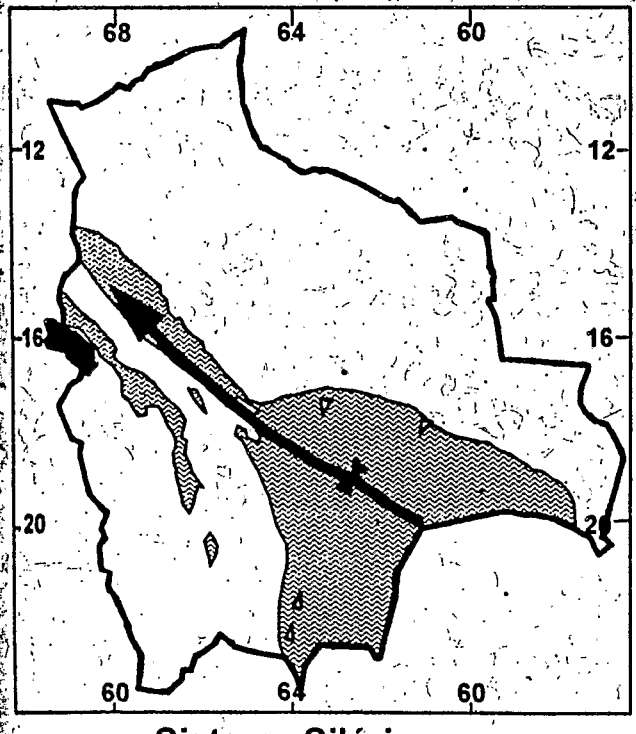
Relictos del Paleozoico



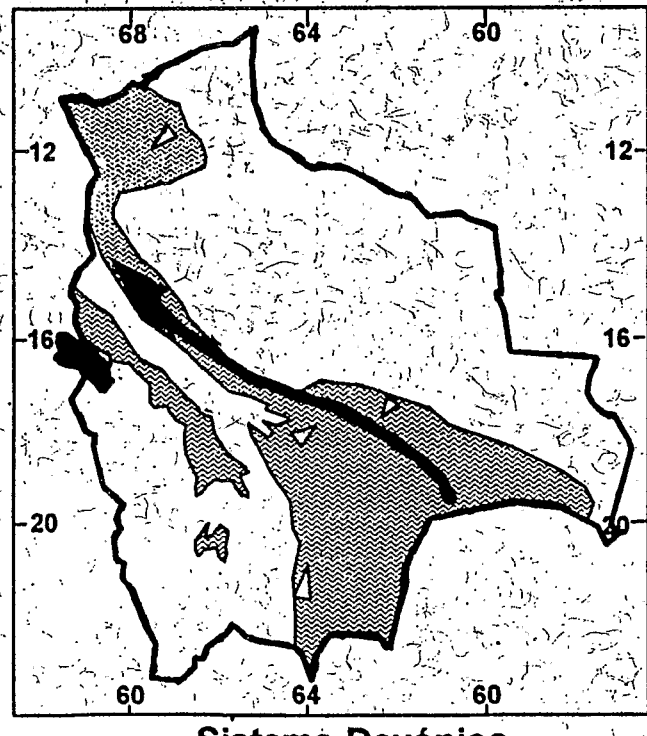
Sistema Carbonífero



Sistemas Permo Carbonífero



Sistema Silúrico



Sistema Devónico

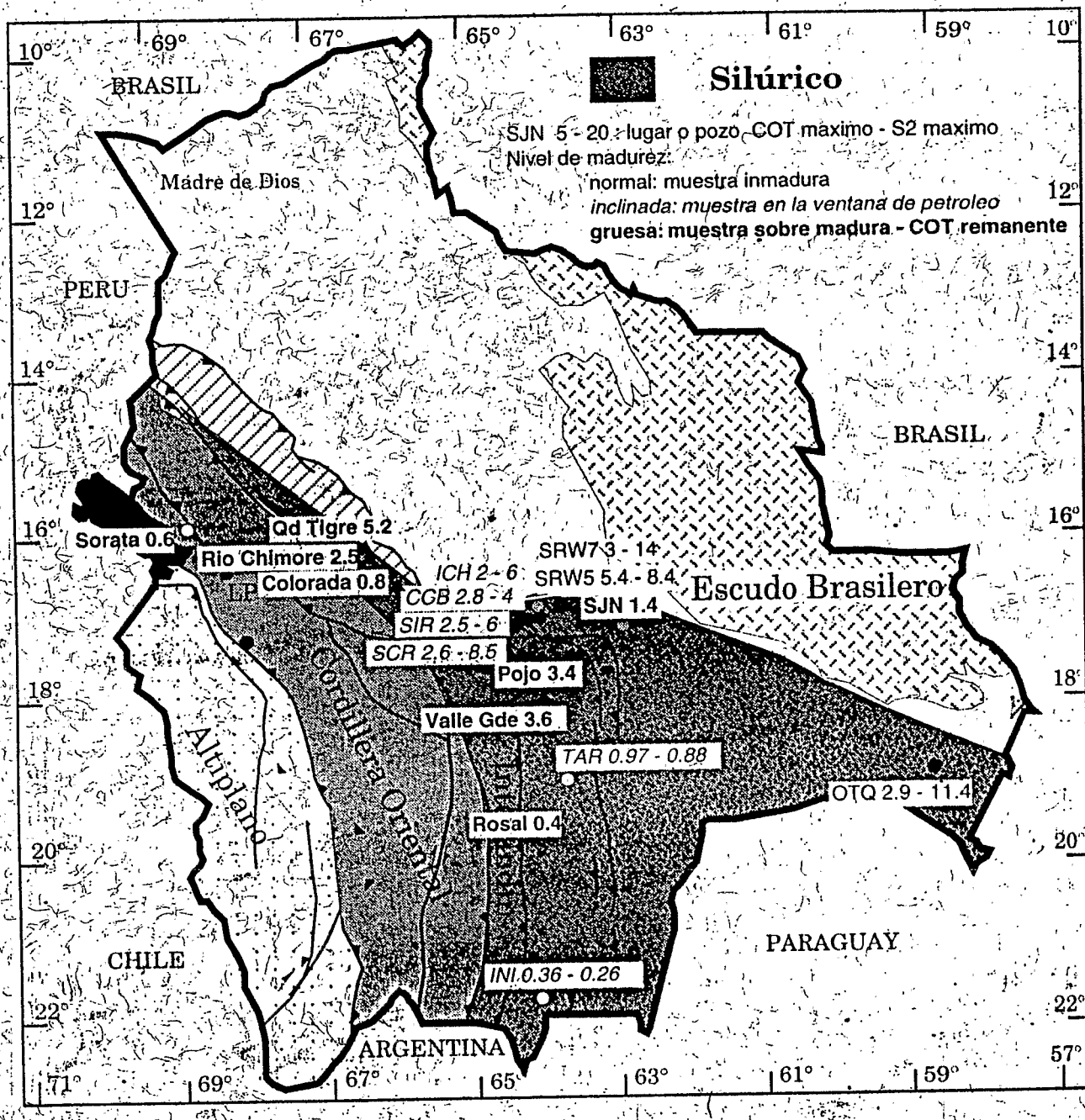


Fig. 4.– Distribución geográfica de las rocas madre silúricas en la cuenca subandina boliviana. El gris indica la presencia de roca madre. SC = Santa Cruz de la Sierra. Los valores indican los mejores valores de COT y S2 actual en los pozos y afloramientos. Los valores en cursiva indican que la roca madre es madura. Los valores en negrita indican que se trata de una muestra sobremadura. El S2 es alrededor de 0 y no se ha mencionado, y el COT debe ser interpretado como un COT remanente. El valor original podría ser 3 veces más elevado.

Fig 4: Distribution of the Silurian source rock: gray areas indicate proven presence of the Silurian source rock. The values are the best COT and the best S2 on wells and outcrops. The font show the maturity level: normal for inmature source rock, italics for mature ones, and bold for overmature one. In this latter case, the S2 has not been mentioned, since it is always close to zero. The TOC is a remanent value, as a quick estimation. The original values were around 3 times higher.

Boomerang, Subandino centro), el COT remanente en la Quebrada El Tigre llega hasta 5.17% para una muestra ya sobremadura.

El Silúrico aflora también en la parte occidental de la Cordillera Oriental. Todos los datos alrededor del lago Titicaca muestran un COT alrededor de 0.6% y un S2 de cero (Aguilera, 1995a). Se puede interpretar como una roca madre sobremadura, con un potencial inicial de COT de más o menos 2%. Más al sur, el Silúrico superior se encuentra en Corregidores, donde está maduro (Pérez, 1994), y en el pozo Vilque, donde está sobremaduro.

La influencia de esta roca sobre el potencial de las zonas está claramente en función de su nivel de madurez antes de la formación de las estructuras. En los pozos del Boomerang no está sobremaduro y entonces el Silúrico participa en el sistema petrolero actual. Al contrario, en el Subandino sur, en los dos pozos donde se conocen datos geoquímicos de la Formación Kirusillas (Iñiguazu-3 y Tatarenda-27), el Silúrico está sobremaduro y el COT remanente no supera el 0.6%, lo que indica un potencial inicial bastante bajo.

En el Chaco, el Silúrico se perforó en el Pozo Otuquis. El COT llega a 2.9%, el S2 a 11.4 mg HC/g y el HI a 398 a 2300 metros para una muestra al inicio de la ventana de petróleo (Tmax = 442°C), lo que indica un COT inicial alrededor de 3%.

En conclusión, el Silúrico parece mejor roca madre al centro y al este que al sur (zona más proximal). En el Boomerang y el Chaco, se calcula un S1+S2 inicial promedio de 8 mg HC/g. Más al sur, el potencial disminuye.

Devónico Inferior y Medio

La sucesión devónica presenta el mismo ambiente de depositación que el Silúrico superior. Su espesor se incrementa hacia el sur, alcanzando hasta 1500 m al Sur del sector del Boomerang. Esta distribución regional se ve en las figuras 3 y 5. La cuenca se extiende al Perú hacia el norte y a la Argentina y Paraguay hacia el sur. El Devónico ha sido erosionado en el noreste. La edad de este acontecimiento será discutida más adelante. Las rocas madre incluyen a las formaciones Tequeje en el norte, Limoncito y Boomerang en la parte central de la cuenca, y Los Monos, Huamampampa, Icla y Santa Rosa al Sur.

El Devónico medio es la roca madre clásica de Bolivia. Es la roca madre en todos los campos del Subandino Sur y del Boomerang, que son actualmente las zonas más productivas. Desde un punto de vista geoquímico, el Devónico es una roca madre pobre con un S2 inicial promedio de 2 mg HC/g, pero su interés radica en su gran espesor. Los numerosos pozos del Subandino Sur y del Boomerang han permitido hacer mapas de los valores actuales de S2 (Fig. 5) y de calcular un COT inicial en función de los parámetros actuales es de Rock Eval y del nivel de madurez (Fig. 6).

Al norte, en la cuenca Madre de Dios, la Formación Tequeje tiene poco espesor (200 m) y un COT promedio de 0.8% (S2=2.3 mg HC/g para una roca al inicio de la ventana de petróleo, Tmax = 440°C). En el Subandino Norte, no hay datos de pozos sobre el Devónico inferior y medio. En los afloramientos de la zona de Lliquimuni, los mejores valores son de 1.3% para el COT (S2=4 mg HC/g, Tmax=440°C). Al oeste de la Cordillera Oriental, el Devónico aflora sobre casi todo el borde del Altiplano, pero hay que notar que está siempre sobremaduro. En la zona norte del lago Titicaca, de Sorata hasta la frontera, la Formación Colpacucho tiene un COT residual promedio de 1% y el espesor de lutitas es muy importante (más de 500 metros). Igualmente, en esta zona, en el límite entre las formaciones Icla y Belén se encuentra un COT residual con un valor promedio de 1.3%. Al sur de La Paz, la sección completa aflora en Sica Sica con un espesor de 3000 metros, donde los COT varían de 0.4 a 1.2 %, y toda la serie está sobremadura. Los mejores valores se encuentran dentro de la Formación Colpacucho.

En el Boomerang-Subandino Centro, los mejores valores se encuentran en las lutitas del Devónico inferior (Fm. Boomerang). Dentro de este se pueden individualizar algunos metros con datos todavía más altos, los cuales se pueden definir claramente sobre el *gamma-ray* de los pozos. El espesor de estas lutitas es de 100-150 metros. En ciertas zonas, todo el Devónico inferior puede estar en facies pelíticas, como en el pozo de Puerto Ramos-X1 (figura 13). En este pozo, la Formación Boomerang tiene un espesor de 500 metros, dentro de los cuales los últimos 80 metros (de 4600 a 4680m) tienen el mejor potencial, con un COT promedio de 1.5% y un S2 promedio de 2.5 mgHC/g. El HI no es muy alto, entre 100 y 140 en casi todas las muestras analizadas. Se trata de un potencial remanente. La ventana de petróleo se sitúa más o menos a 4500 metros. El potencial inicial que se puede deducir es un S2 alrededor de 5 mgHC/g y un Indice de Hidrógeno inicial de 300 a 400. Esta parte basal del Devónico inferior presenta una mayor riqueza en otros pozos, como por ejemplo San Juan-X2, Sicuri-X1 y Sirari-X1.

Encima de esta secuencia, está la Formación Limoncito, que presenta un potencial como roca madre en todo su espesor de lutitas, hasta 1300 metros en el pozo San Juan-X2. En este pozo, la parte superior de la Formación Limoncito está al inicio de la ventana de petróleo e indica un S2 promedio actual de 3 mg HC/g, lo que corresponde a un S1+S2 inicial alrededor de 6 mg HC/g. Estudiando los datos de la Formación Limoncito, no se puede definir claramente una zona más o menos rica en materia orgánica, tanto en función de la profundidad como de la ubicación. Por lo tanto, el punto crucial sería el espesor de la serie.

En el Subandino Sur y Chaco, todas las lutitas de la serie devónica presentan calidad de roca madre en las formaciones Los Monos (378-365 Ma) o Icla-Huamampampa (396-378 Ma). Estas pertenecen a secuencias de sedimentos silico-clásticos de plataforma marina con una paleobatimetría de 50-200 metros.

Indiscutiblemente, la Formación Los Monos es la principal roca madre. Las muestras de campo son parcialmente maduras, el mejor IH es del 465 y el COT máximo de 2%. Los pozos muestreados pueden presentar un potencial débil, pero no

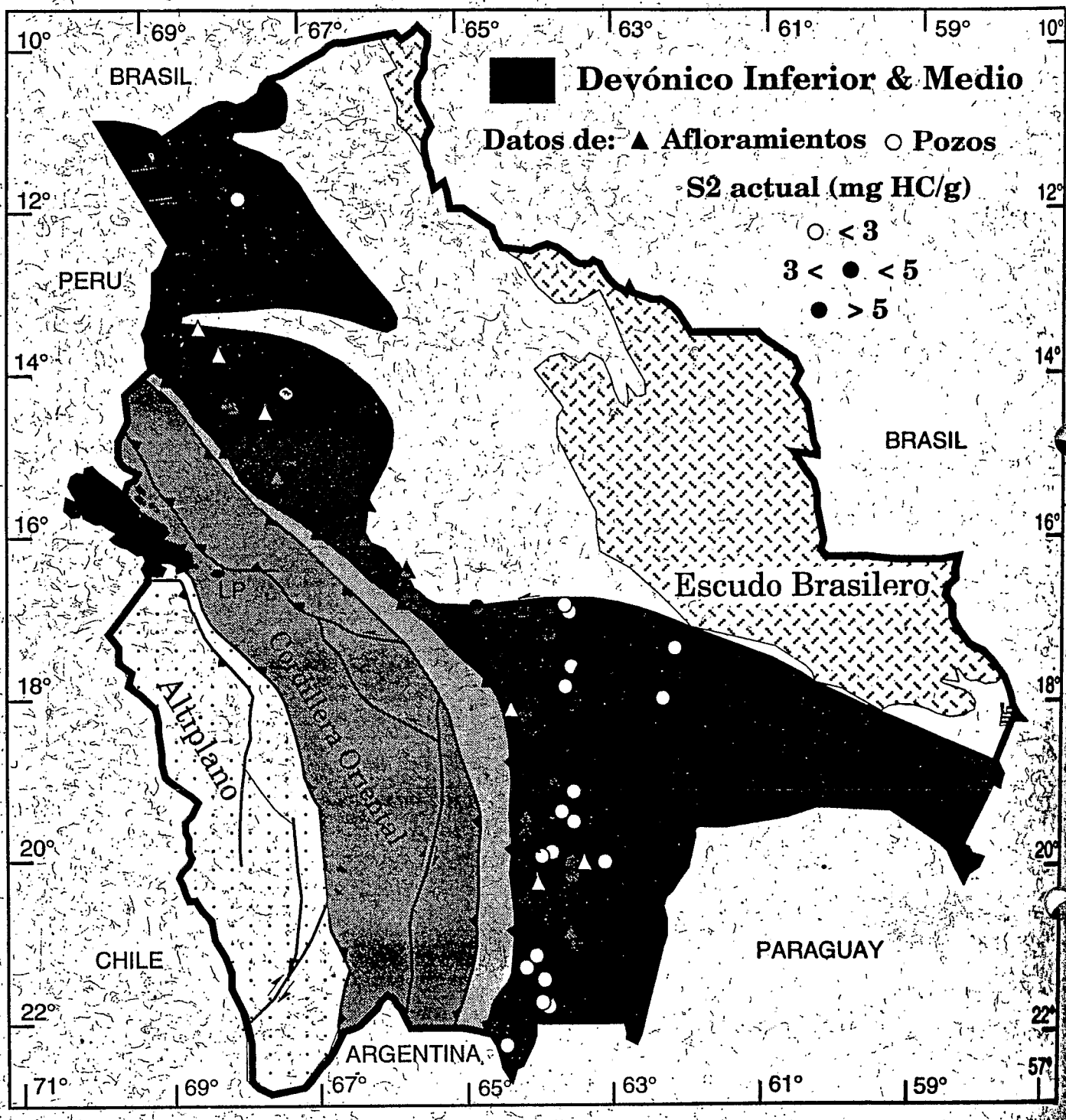


Fig. 5.– Distribución y riqueza de las rocas madre del Devónico inferior y medio (S2 actual).
Fig 5: Distribution of the Lower and Middle Devonian source rocks, with current S2 values. The circles are well data and the triangles are outcrop data.

despreciable (S2 residual entre 1 y 3 mg HC/g) sobre todo en cuanto a su espesor, como por ejemplo en los pozos Parapetí-X1, Pilcomayo-X1 y Camiri 201. El espesor total de la serie en el caso de Camiri es de 1800 m porque esta duplicada (estructura en duplex), ya que el espesor normal de la serie es de 700 m.

Hay muchos menos valores de geoquímica para el Devónico inferior porque las perforaciones tenían objetivos dentro del Carbonífero y del Devónico superior a medio.

La Formación Huamampampa es más arenosa pero sus lutitas presentan un potencial equivalente al de otras formaciones, con un COT máximo de 2.5% y un S2 de 7.6 mg HC/g (pozo Honduras-X2). En valor promedio, la parte de lutitas no constituye más de 25% de la formación y presentaría un COT inicial de 1-1.5%.

La Formación Icla es muy similar pero tiene más lutitas. Los valores más altos se encontraron en el pozo Caigua-X3 con COT de 1.3% y S2 de 2.7 mg HC/g. En el pozo Huayco, entre las profundidades 1900 y 2400 metros, las 30 muestras analizadas tienen valores de COT inferiores a 0.3%, lo que es muy bajo incluso si se trata de una roca sobremadura. En superficie, en el Río Huacareta, tiene un COT máximo de 0.7% para una muestra en la ventana de petróleo (S2=1.1mg HC/g, HI=175, Tmax=451°C), lo que corresponde más o menos a un COT inicial de 1.5%. Como para la Formación Huamampampa, un COT promedio de 1% para el 50% de la serie sería representativo.

Devónico Superior: Formaciones Tomachi e Iquiri

El potencial de roca madre del Devónico superior se comprobó en los pozos de la cuenca de Madre de Dios y en algunos afloramientos del Subandino norte. En los pozos Pando-X1 y X2, el carbono orgánico total (COT) excede el 3.5% en un intervalo de 200 m con un Indice de Hidrógeno (IH) por encima de 700 mgHC/g. Todas las lutitas tienen algún potencial (COT > 2%), alcanzando los 400 m de espesor. La mejor facies se encuentra en la base de la formación, 200 metros de espesor con un S2 promedio de más de 22 mg HC/g y llegando hasta 80. En el Pozo Pando-X1, la Formación Tomachi es inmadura, lo que fue confirmado también por valores de vitrinita (Ro < 0.5% hacia 1500 m). El valor promedio de S1+S2 es de 25 mg HC/g sobre 250 metros, y de 10 sobre 200 otros metros, lo que corresponde a un SPI total de 16.5 considerando que 80% de la serie son lutitas.

En la zona de Lliquimuni, se encontraron valores de S2 hasta 23 mg HC/g en el afloramiento de Bella Vista (muestra ya en ventana de petróleo, Ro=0.96), pero hay que mencionar que los datos son poco numerosos. Como los pozos de Tacuaral y Lliquimuni no han perforado el Devónico, no se conoce el espesor de esta roca madre en la zona.

En el centro y sur, el Devónico superior corresponde a la Formación Iquiri. Ninguno de los datos de los pozos del Boomerang ni del Subandino sur presentan un potencial tan alto como el de la Formación Tomachi, pero todas la lutitas de la Formación Iquiri tienen un potencial similar al de las formaciones Los Monos o Limoncito. Estas muestras no son nunca inmaduras. En los datos de pozos, el mejor IH residual registrado es de 416 y el TOC más elevado es de 3.5% (pozo Guanacos). En el pozo San Juan-X2 ocurre como en el norte, la base de la Formación Iquiri presenta el mejor potencial, 200 metros con un S2 promedio de 2.2 mg HC/g (*maximum* 3.7 mg HC/g) para una muestra en el inicio de la ventana de petróleo. En los afloramientos del Subandino centro se encontraron valores un poco más altos (COT=1.15%, S2=5.3 mg HC/g y HI=460). Las facies son más proximales que para la Formación Tomachi, y sólamente alrededor de la mitad de la serie son lutitas.

Devónico superior-Carbonífero inferior: Grupo Retama

En el Subandino norte y la cuenca Madre de Dios, las lutitas de la parte inferior del Grupo Retama, de edad Devónico superior-Carbonífero inferior, llamada también Formación Toregua, muestran algún potencial de hidrocarburos. Su depositación se inicia en el Fameniano tardío (360 Ma) y pudo haber continuado hasta el Viseano (333 Ma). Para simplificar y no confundir con la edad de las rocas madre del Devónico medio y inferior, utilizaremos la edad Carbonífero para denominar esta roca madre, aunque su sedimentación empezó en el Devónico superior. La Formación Toregua corresponde a depósitos silicoclásticos de plataforma marina con alternancia de lutitas y arenas. Esta formación se presenta en la cuenca de Madre de Dios con un espesor de 200 metros que aumenta hacia el Subandino norte, donde presenta un espesor de hasta 500 m (Río Kaka).

En la cuenca Madre de Dios, el S2 máximo es de 3.77 mg HC/g, el COT de 1.76% y el HI de 214 (la muestra está inmadura) y muchas muestras tienen un potencial muy bajo (Aguilera, 1995b).

Conviene mencionar que algunos autores (Sempere, 1990) haciendo correlación entre el Carbonífero del lago Titicaca y de la cuenca Madre de Dios, han atribuido la zona rica en materia orgánica del pozo Pando a la Formación Toregua. Por otro lado, en trabajos de campo (Beccar & Toledo, 1990), el límite entre las formaciones Tomachi y Toregua está basado en el cambio de litología (mica => sílice). Parece que cada autor ha usado el nombre de Formación Toregua para cosas bastante diferentes. Resulta una gran confusión y, en algunos informes, se habló de una roca madre carbonífera potente y muy rica (Baby *et al.*, 1994) cuando las dataciones palinológicas muestran sin duda alguna que la zona rica en materia orgánica en Pando-X1 está 400 metros más profunda que el límite Devónico-Carbonífero, y por lo tanto es de edad devónica.

En la base de datos, algunas muestras de afloramientos de las zonas de Madidi y Lliquimuni tienen un potencial muy elevado (S2>20 mg HC/g). Según los informes de campo, pertenecerían al Grupo Retama, pero pueden ser la Formación Tomachi. Esta información no ha sido incluida en los mapas, pero permite ser optimista sobre la presencia de una roca madre rica del Devónico terminal en todo el norte y centro del Subandino norte.

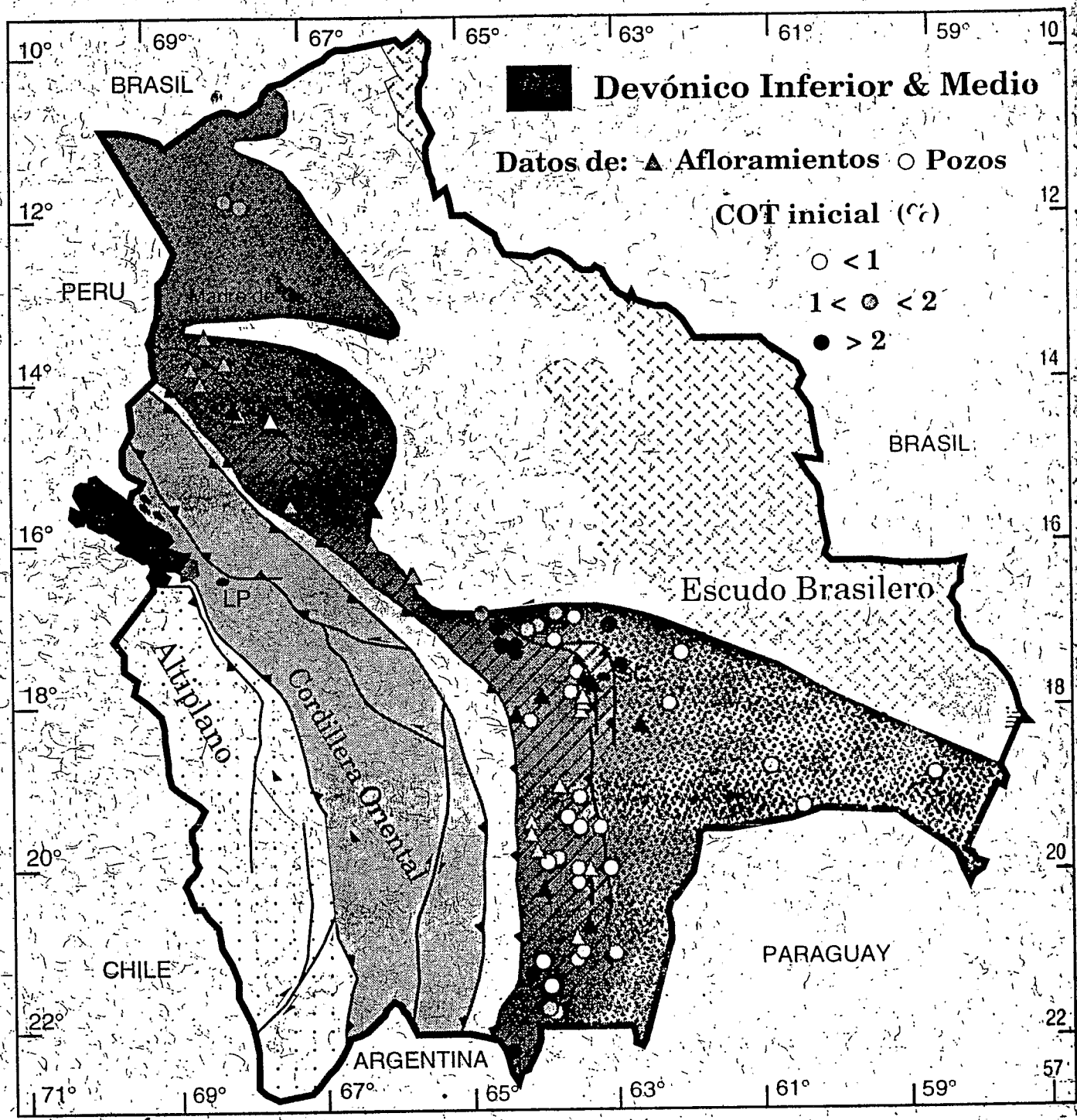


Fig. 6.- Riqueza original de las rocas madre del Devónico inferior y medio, basado en datos de pozo y superficie, y estimando el COT inicial en función del nivel de maduración y del COT remanente. Se han usado ábacos hechos con el programa GENEX para calcular la evolución del COT en función de la maduración, Tmax del RockEval y reflectancia de la vitrinita.

Fig 6: Distribution of the Lower and Middle Devonian source rock, based on well and surface data. Original COT deduced from the current one and the maturity level. (Tmax & vitrinite). The calculation has been done using the model GENEX.

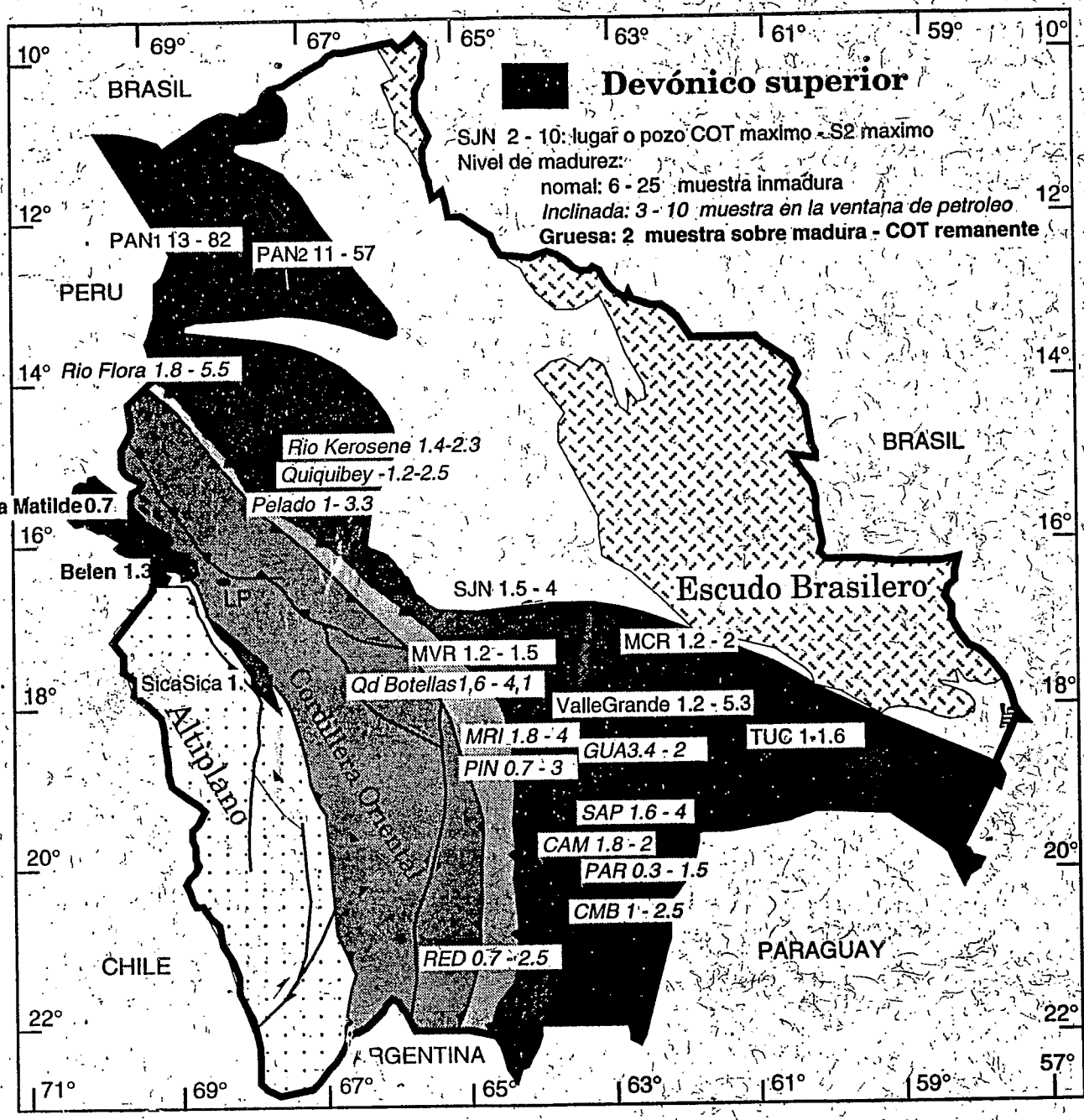


Fig. 7.– Distribución y riqueza de las rocas madre del Devónico superior.
Fig. 7: Distribution of Upper Devonian source rocks. For maturity levels see fig. 4

Carbonífero superior-Pérmico inferior: Fm. Copacabana

La Formación Copacabana se depositó en un ambiente marino de rampa carbonatada poco profunda, y consiste en una alternancia de calizas, lutitas, margas, dolomías, areniscas y tobas volcánicas. Su depositación comenzó en el Bashkiriano (320 Ma) y continuó hasta el Pérmico inferior (270 Ma). Está presente en la cuenca de Madre de Dios, en el Subandino Norte, sobre el Altiplano norte, y en menor extensión en el Subandino centro (Fig. 3 y 8). Donde no ha sido erosionada, alcanza un espesor de 800 m. Al sur de Perú, el espesor de esta unidad supera los 1000 m. Las facies alrededor del lago Titicaca son bastante proximales (calizas y areniscas) y los espesores de lutitas son reducidos. La cuenca se profundiza hacia el este, de tal forma que los afloramientos del área de Lliquimuni representan un zona mucho más distal. Hacia al norte, en la cuenca de Madre de Dios, el espesor de lutitas es también más reducido, y se trata probablemente de una facies proximal con aportes del este, y más estable que al oeste. Entre Lliquimuni y Madre de Dios, la Formación Copacabana ha sido erosionada en el Triásico debido al levantamiento del Alto de Madidi. Más al sur, entre el Boomerang y la Argentina, los depósitos equivalentes de la Formación Copacabana son más proximales y más arenosos (Formación Cangapi).

Los análisis de Rock Eval confirman un potencial petrolífero para esta formación. Los registros de COT varían entre 1 y 9%, y el máximo IH está cerca de 700. La formación aflora y fue perforada en los pozos de la cuenca Madre de Dios, Lliquimuni y Tacuaral. En la zona de Lliquimuni su potencial es excelente, S2 hasta 47 mg HC/g. El pozo de Lliquimuni muestra 3000 metros de Formación Copacabana con un valor promedio de COT de 1.6 % y de S2 de 6.67 mg HC/g, pero el pozo fue perforado sobre un flanco vertical y entonces el espesor de la roca madre no se puede deducir de este pozo. Mirando los picos del S2, parece que la zona más rica de la roca madre (S2 >10 mg HC/g) fue atravesada tres veces, a 2000, 3300 y 4000 metros. En Tacuaral-X1, el espesor de la Formación Copacabana es de 700 metros. Sólo la parte inferior tiene un buen potencial, alrededor de 250 metros tienen un S2 de más de 5 mg HC/g (valor promedio 10 mg HC/g). El nivel de madurez es equivalente a un Ro de 0.7, entrada de la ventana de petróleo. Se trata de una maduración heredada anterior a la deformación principal del Mioceno, presente en los anticlinales, que entonces muestra poca evolución en los pozos (Baby *et al.*, 1994). El potencial original de la Formación Copacabana que se puede deducir de estos datos es de 250 metros con un COT de más de 2.5 y un HI hasta 700, lo que significa una roca madre excelente, con un S1+S2 inicial alrededor de 10 mg HC/g en la zona de Lliquimuni.

En la cuenca Madre de Dios, la Formación Copacabana tiene un espesor actual alrededor de 200 metros. La parte superior fue erosionada en el Triásico. Se trata de calizas blancas con un COT muy bajo (inferior a 0.5%), y la parte de lutitas no sobrepasa los 10 metros, en los que se encuentran algunos valores buenos (S2 hasta 10 mg HC/g en Pando-X1, y 16 mg HC/g en Manuripi-X1; Aguilera, 1995b).

Alrededor del lago Titicaca, la Formación Copacabana está también presente. Las litologías predominantes son calizas, margas y areniscas. Los espesores de las lutitas son muy delgados y nunca presentan un potencial tan alto como en los Yungas. Un COT remanente de 1.72 % fue medido en la península de Cumaná, pero corresponde a una capa de algunos centímetros que está sobremadura. Igualmente, en Belén, sobre la península de Copacabana, una muestra de carbón ha dado un COT de 23% para una roca sobre madura (S2=1.8, Tmax=458°C). Se trata de un valor aislado entre otros que son muy bajos. Al nordeste del lago, los valores llegan hasta 2.4 % para una muestra en la ventana de petróleo (S2=4 mg HC/g, Tmax= 443°C), pero la mayoría de los valores son muy bajos y el espesor de las lutitas es también reducido. En la Cordillera Oriental, la Formación Copacabana quedó preservada en el núcleo de algunos sinclinales, como en Morochata (zona de Cochabamba), donde presenta un potencial medio: COT de 2.7%, S2=3.48 mg HC/g, HI=290, Tmax=435°C, el espesor de las lutitas es de 80 metros.

Faltan todavía datos para definir con precisión los límites geográficos de distribución de la zona rica en materia orgánica, especialmente al norte de Lliquimuni. Actualmente, al norte del Alto de Madidi, la Formación Copacabana está compuesta casi exclusivamente por calizas, y no presenta un potencial petrolero, pero como este alto es una estructura post-Pérmico, se puede suponer una disminución progresiva del espesor de lutitas de la zona de Madidi hacia Madre de Dios. Según el mapa paleogeográfico de Sempere (1995), el centro de la cuenca para el intervalo Carbonífero-Pérmico pasa por Lliquimuni y Madidi, y la zona de Madre de Dios se situaría en una zona más proximal. De acuerdo a esta interpretación, cabe esperar un buen potencial de la Formación Copacabana para toda la zona del Subandino norte al noroeste de Lliquimuni. Hasta ahora, ninguno de los pocos datos de la zona de Madidi presentan un potencial alto para la Formación Copacabana, pero hay que esperar los resultados de los primeros pozos (principios de 1996) para poder tener conclusiones.

Cretácico: Fms. Flora y El Molino

El Cretácico es la roca madre clásica de América del Sur desde Venezuela (La Luna) hasta la Argentina, incluyendo Colombia y el Subandino ecuatoriano. Se trata de una roca madre marina depositada en un contexto de trasarco. En Bolivia, no se encuentran estas facies, pero en el Altiplano la base de la Formación Chaunaca (Santoniano-Campaniano) y sobre todo el Maastrichtiano (Fm. El Molino) presentan un nivel con un buen potencial (S2 hasta 20 mg HC/g en la zona del lago Poopó; Moretti & Aranibar, 1995, este volumen). Lamentablemente, la parte de roca madre es bastante delgada, 5 metros en la Formación Chaunaca y alrededor de 30 metros en la Formación El Molino.

Existen también algunos datos del Subandino norte, en la frontera con el Perú, que indican un potencial alto (TOC=2.45%, S2=18 mg HC/g, HI=747, Tmax=441°C) para el Cretácico superior (Formación Flora). En el afloramiento, las margas y

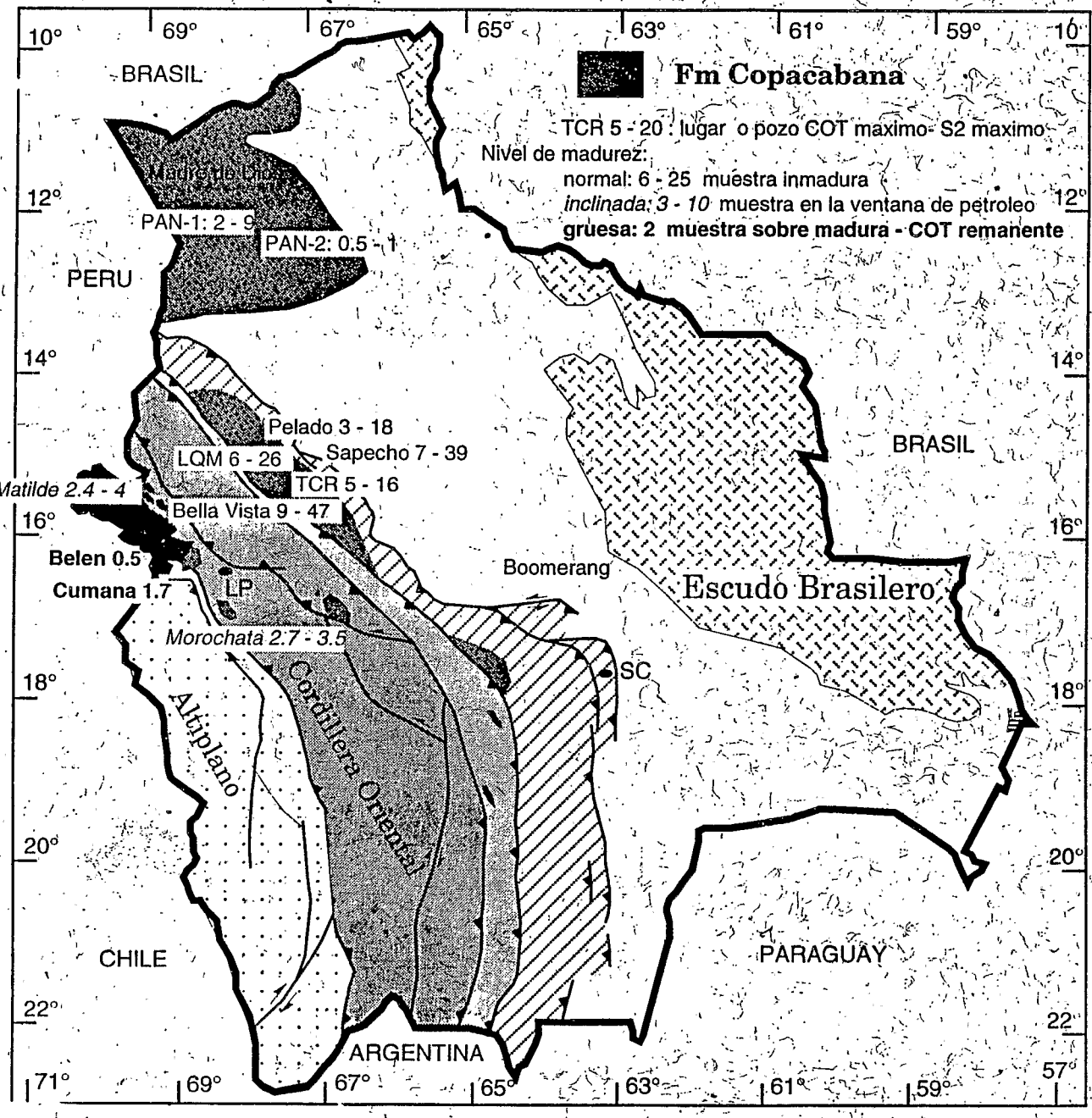


Fig. 8.– Distribución y riqueza de las rocas madre del Carbonífero superior y Pérmico.
Fig. 8 Distribution of Late Carboniferous and Permian source rocks (Copacabana Fm.). For maturity levels see fig 4

lutitas tienen un espesor alrededor de 50 metros, la litología principal es caliza y el ambiente de depositación es marino somero (Beccar & Toledo, 1990). La Formación Flora fue comparada con la Formación El Molino que tiene la misma edad y el mismo tipo de potencial (Vernet & Botello, 1975). Hacia el norte, en Pando, el Cretácico terminal fue erosionado antes de la sedimentación del Oligoceno superior de la Fm. Bala. Más al sur, en el centro y sur del Subandino norte, el Cretácico superior falta, posiblemente debido a la erosión pre-Oligocena (López, 1974). Del Boomerang hacia el sur, el Cretácico superior es arenoso y continental (Formación Cajones). A nivel del pozo de Tacuaral, el Cretácico no contiene lutitas y margas.

En conclusión, la extensión de las facies ricas en materia orgánica de la Formación Flora es muy local y sólamente puede tener un interés en la zona de Madidi.

PERSPECTIVAS

Introducción

Dado que todas las rocas madre son más viejas que el orógeno andino, el factor principal en la exploración es la riqueza de las rocas madre y la relación temporal entre maduración-migración y formación de estructuras. Cualquier migración temprana de hidrocarburos excluiría a las estructuras jóvenes como estructuras potenciales para la perforación.

Se ha utilizado un modelo 1-D (GENEX) para determinar el grado de madurez, utilizándose datos de pozos y afloramientos para calibrar el modelaje. GENEX permite determinar la historia de soterramiento, compactación basada en relaciones de porosidad - profundidad, temperatura, maduración e historial de expulsión. Estudios conjuntos de la estructuración del Subandino y de la maduración de las rocas madre ya fueron hechos y publicados (Baby *et al.*, 1995; Moretti *et al.*, 1995), y también se pueden consultar los informes internos correspondientes. Los detalles de los modelajes que se presentan aquí se encuentran en las publicaciones mencionadas. Las conclusiones pueden ser un poco diferentes porque cuando se hicieron estos trabajos bajo el convenio entre YPFB y ORSTOM, no existía la base de datos geoquímica en YPFB, y los datos disponibles eran mucho menos numerosos. Esto es particularmente válido para el norte (Madre de Dios y Subandino norte) y, en general, para el Silúrico que fue subvalorado en estos trabajos.

Desde un punto de vista general, el flujo de calor es bastante bajo en el antepaís debido a la tasa de sedimentacion elevada del Mioceno superior al actual (ver el mapa del flujo de calor (figura 8) en Moretti & Aranibar, este volumen). En el pozo Itaguazurenda, por ejemplo, el Devónico está en la ventana de petróleo a más de 5000 metros (Tmax=440°C) y en el pozo Puerto Ramos el inicio de la ventana de petróleo se sitúa alrededor de 4500 metros. Es un fenómeno muy clásico de las cuencas de antepaís (Apeninos, cuenca de Viena...). En la zona estructurada del piedemonte, los datos son más variables debido a la erosión en los anticlinales pero la ventana de petróleo es igualmente baja en las cuencas de *piggy back* donde los depósitos recientes son también muy potentes.

El potencial petrolífero (SPI) resultante para cada zona puede verse en la Tabla 1.

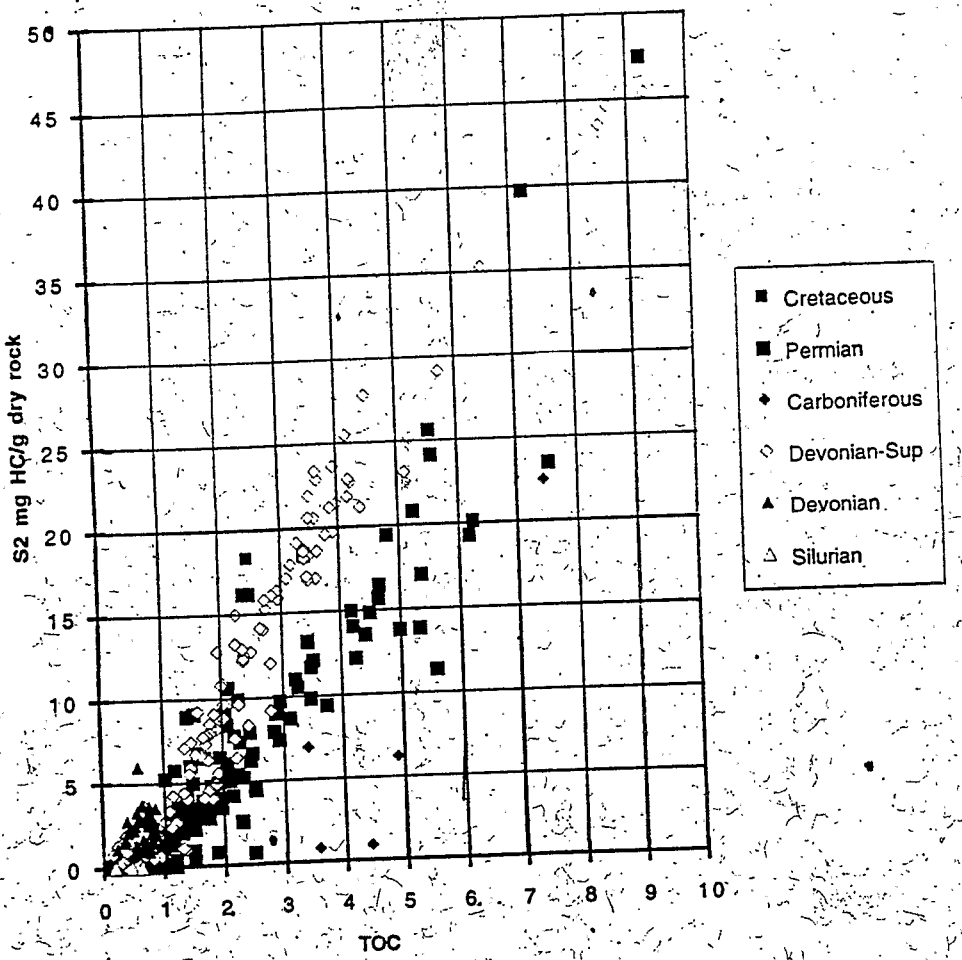
Madre de Dios

El Paleozoico inferior no existe, y el Silúrico superior se presenta sólamente con algunos metros. El Devónico inferior a medio (Fm. Tequeje) tiene un potencial medio a bajo (S1+S2 promedio de 3 mg HC/g) y un espesor reducido, de 300 metros en el pozo Pando-X1. Como la cuenca se profundiza hacia el sur y oeste, un valor de 500 metros sería más representativo del área de drenaje, lo que conduce a un SPI de 3 (80% de la serie es roca madre). El Devónico superior (Formación Tomachi) tiene un potencial excelente, 250 metros con un S1+S2 promedio de mas de 25 mg HC/g y encima 200 metros con un S1+S2 promedio de 10 mg HC/g (=> SPI de 16.5 t/m^2). El Carbonífero (Fm. Toregua) es delgado y tiene un potencial bajo. El Carbonífero superior-Pérmico inferior también tiene poco espesor y la parte de lutitas no llega a 10 metros, su interés como roca madre es casi nulo. Cuando se suman estas influencias (Tabla 1), el SPI final de la cuenca es de más de 20 t/m^2. Los reservorios potenciales son las areniscas del Carbonífero (formaciones Kaka y Yaurichambi) y sobre todo las de la Formación Tomachi. Actualmente, las rocas madre son inmaduras en los pozos pero la cuenca se profundiza hacia el sur y el oeste, y los hidrocarburos pueden migrar desde las zonas más profundas a la más someras (Baby *et al.*, 1993).

Hasta ahora no se conocen campos petrolíferos en la cuenca. El Pozo Pando-1 de Oxy y Mobil fue un éxito, pero los siguientes pozos de delineación de las estructuras no han dado los resultados esperados y fueron probadas reservas de más de 0.5 Mb en Pando. Sin embargo, esta cuenca tiene un enorme potencial, a pesar de que las estructuras son difíciles de definir. La compresión andina no afecta a la zona, la cual esta situada en la llanura. Además, la densidad de la yegetación encarece y dificulta las campañas de sísmica que permitirían definir trampas estratigráficas.

Subandino Norte: zona de Madidi

La zona de Madidi corresponde a la terminación sur de la cuenca Madre de Dios, pero sí que está afectada por la deformación andina. El único pozo en la zona es el de Tuichi, perforado en 1976 y que no llega hasta los reservorios. El segundo debe ser perforado al final de 1995 por la empresa Total; por lo tanto, los datos de roca madre son poco numerosos. El Silúrico fue erodado antes del Devónico. El Devónico medio y el inferior deben tener el mismo potencial que en otras zonas, es decir, un S1+S2 promedio alrededor de 3 mg HC/g y un espesor de 700 metros. La zona está ubicada entre Madre de Dios, donde el Devónico superior tiene un potencial excelente, y la zona de Lliquimuni, donde la Formación Copacabana tiene un buen potencial. El Alto de Madidi es una estructura post-Paleozoico y por lo tanto se puede esperar que el Devónico superior (Fm.



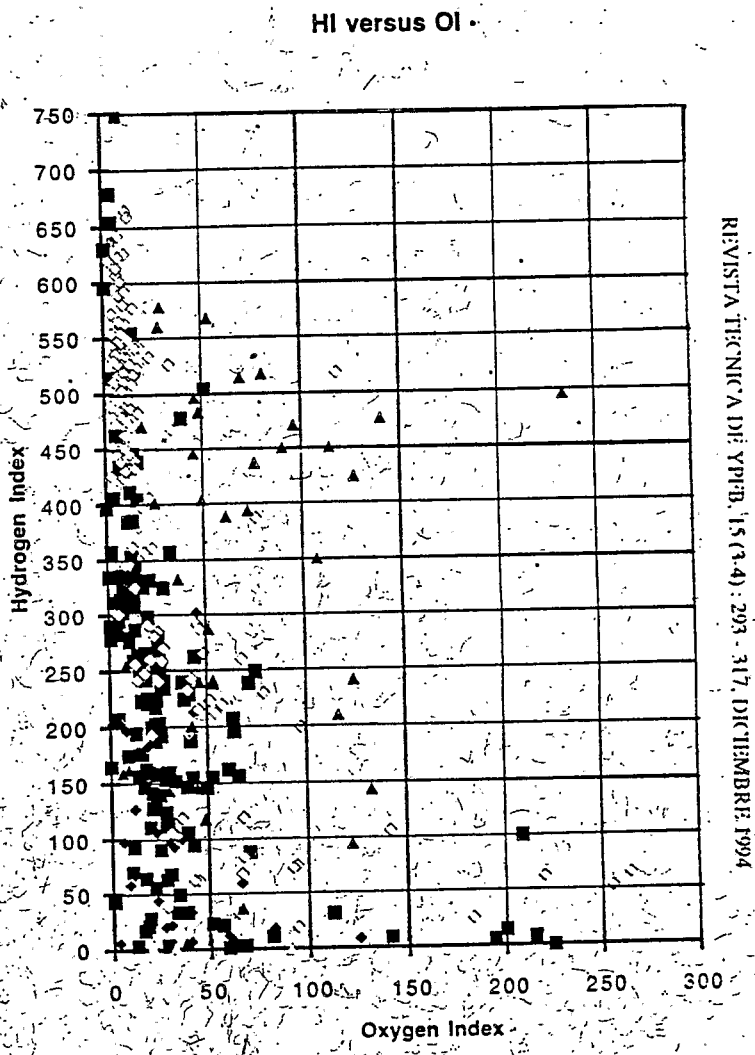


Fig. 9.– Datos del Subandino Norte y Madre de Dios (afloramiento y pozo). a - S2 *versus* COT para cada roca madre b - Indice de Hidrógeno *versus* Indice de Oxígeno.
Fig 9: Data from the northern part (Madre de Dios & Northern Subandean Zone). a - S2 versus TOC for each source rock. b - Hydrogen Index versus Oxygen Index.

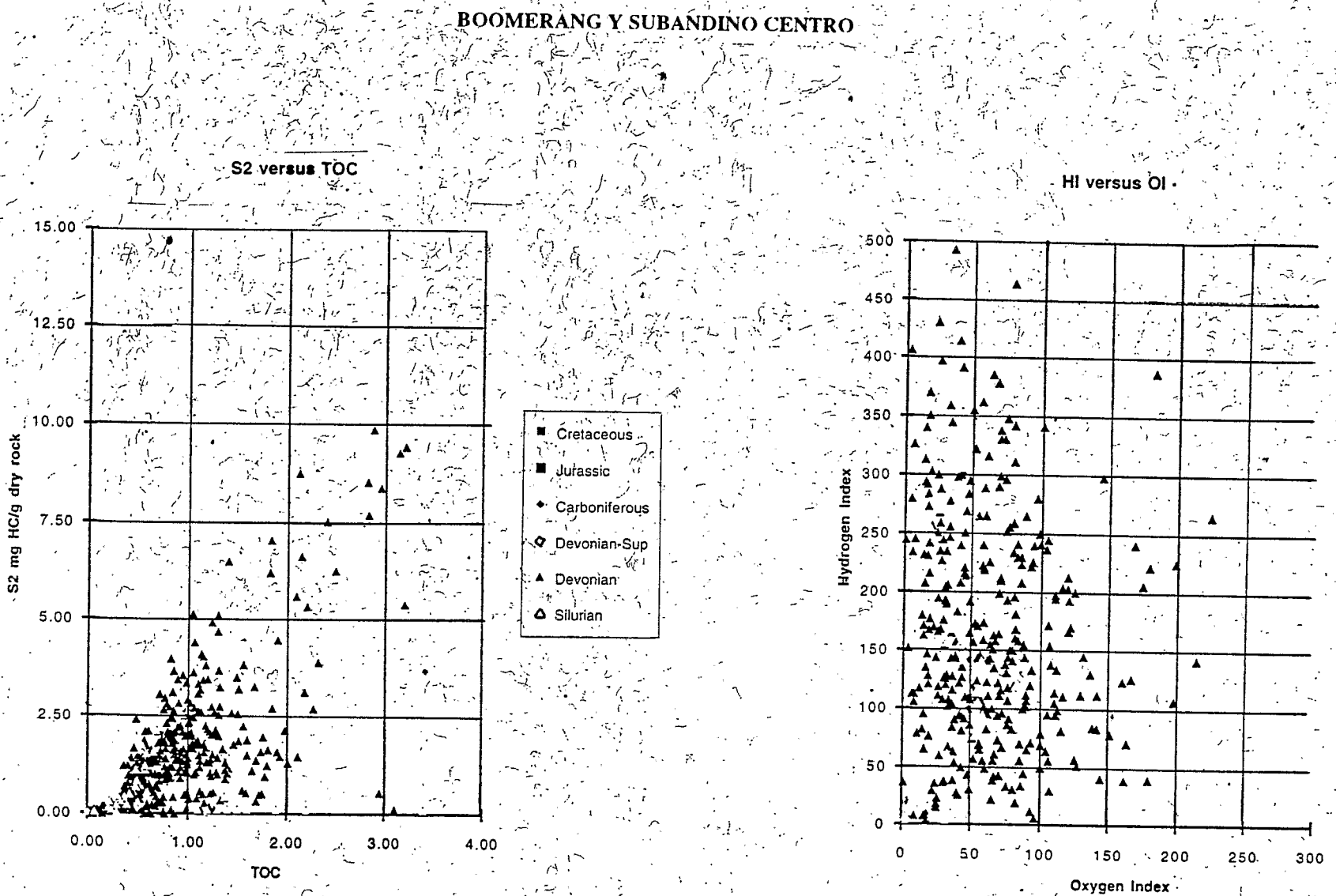


Fig. 10.– Datos del Boomerang y Subandino centro (pozo y afloramiento). a - S2 *versus* COT para cada roca madre b - Indice de Hidrógeno *versus* Indice de Oxígeno

Fig 10: *Data from the central part (Boomerang & central Subandean Zone). Wells and outcrop a - S2 versus TOC for each source rock b - Hydrogen Index versus Oxygen Index*

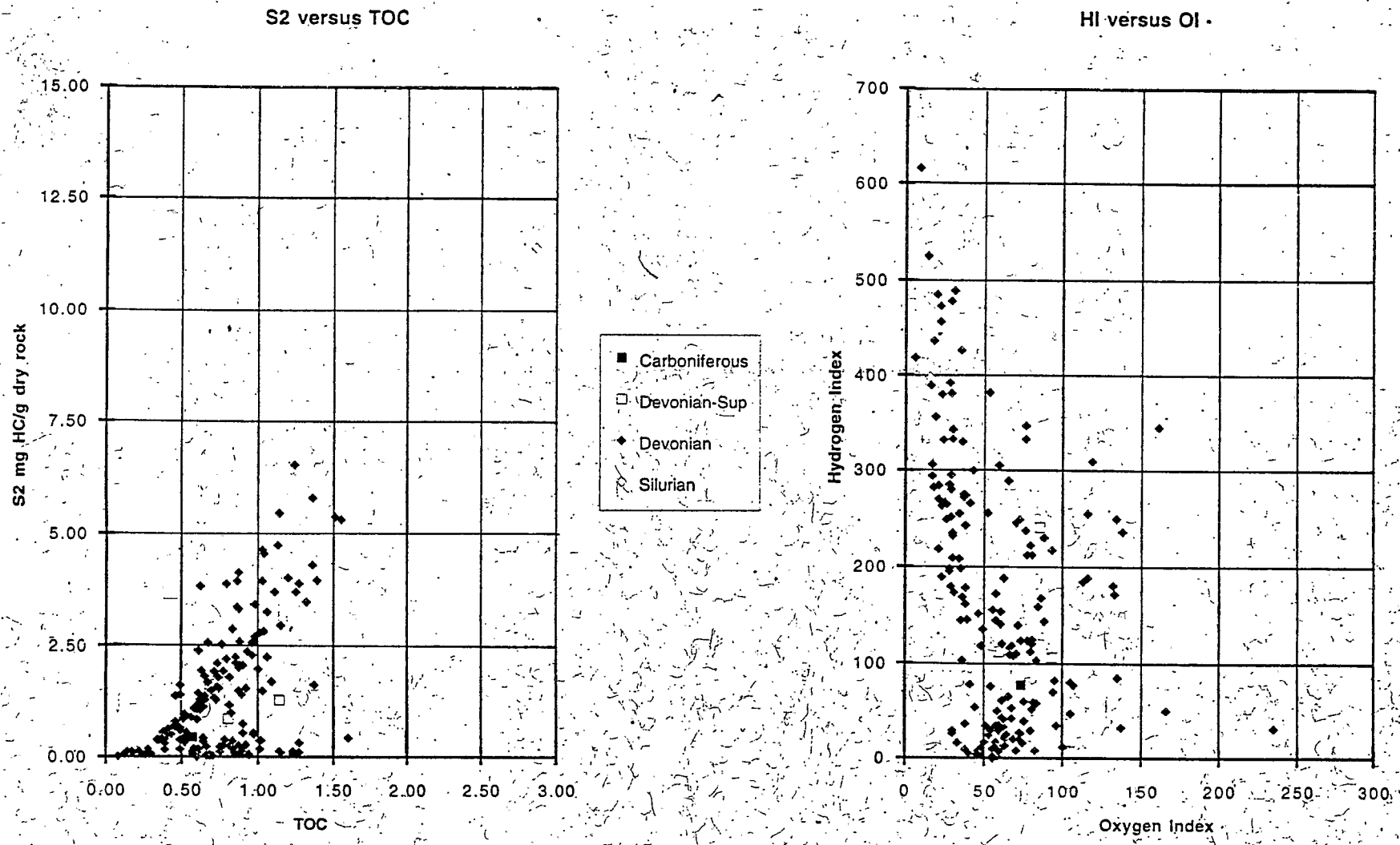


Fig. 11.– Datos del Chaco (pozos) a - S2 *versus* COT para cada roca madre b - Indice de Hidrogeno *versus* Indice de Oxigeno

Fig 11: Data from the eastern part (Otuquis, Tucavaca, Ravelo wells). a - S2 versus TOC for each source rock b - Hydrogen Index versus Oxygen Index

SUBANDINO SUR & SANTA CRUZ

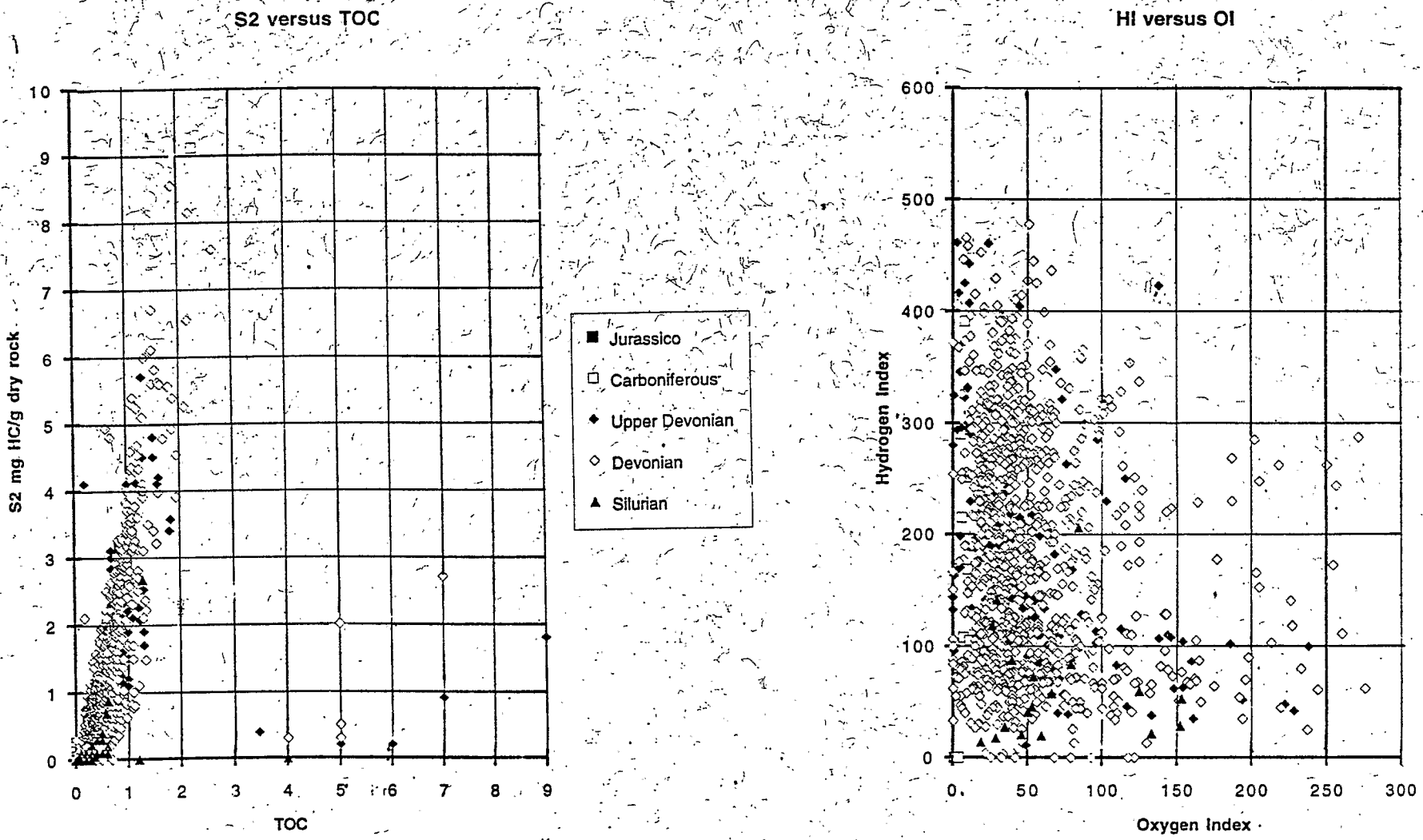


Fig. 12.– Datos del Subandino sur (pozos & afloramientos) a - S2 *versus* COT para cada roca madre b - Indice de Hidrógeno *versus* Indice de Oxígeno

Fig 12: Data from the south (Southern Subandean Zone), Wells and outcrop a - S2 versus TOC for each source rock. b - Hydrogen Index versus Oxygen Index

Tomachi) tenga el mismo potencial que en la cuenca Madre de Dios. La Fm. Copacabana parece tener mas calizas y menos lutitas que en Lliquimuni, y además, como ya fue mencionado, el levantamiento del Alto de Madidi ha inducido una erosión fuerte que ha afectado hasta el Devonico en gran parte de la zona. Por lo tanto no se puede esperar un aporte de esta roca madre sino al sur de la zona.

El Cretácico (Formación Flora) puede existir, pero localmente y con poco espesor (100 metros, Beccar & Toledo, 1990), y no se cree que juegue un papel importante comó roca madre. Si el espesor de lutitas es de 50 m, con un S1+S2 promedio inicial de 10 mg HC/g, el SPI sería de 1.25 t/m².

Subandino Norte: zona de Lliquimuni

El Paleozoico todavía no ha sido perforado en esta zona, así que las conclusiones sobre su potencial están basadas sólamente en los datos de campo y son imprecisas. El Devónico inferior a medio tiene una facies parecida a las del Boomerang, por lo tanto un S1+S2 promedio inicial de 3 mg HC/g parece probable, su espesor es alrededor de 800 metros, con un porcentaje de lutitas alto (más de 75%), lo que conduce a un SPI de 4.5 t/m². La mayor incertitumbre es el potencial del Devónico superior, que puede ser bueno como al norte, o ya más bajo como el de la Formación Iquiri en el Boomerang, se concluye que su SPI está entre 3 y 8 t/m². La Formación Copacabana tiene un buen potencial, 250 metros con un S1+S2 promedio de 12 mg HC/g. El SPI de la zona es entonces al menos de 15 t/m2, y tal vez de 20 t/m².

El *timing* es positivo y los anticlinales son inmaduros, lo que significa que la maduración tuvo lugar en los sinclinales durante la estructuración de la zona en el Mioceno. Como ya se mencionó, la geometría de la zona se caracteriza por cuencas de *piggy back* muy profundas de hasta 6000 metros (Baby *et al.*, 1994b). Por lo tanto, se encuentran en el área de drenaje todos los niveles de maduración del inicio de la ventana de petróleo hasta sobremaduro. Lamentablemente, los tres pozos de Boya, Lliquimuni y Tacuaral no llegaron hasta los reservorios, pero claramente se puede ser muy optimista sobre el potencial de la zona.

Subandino Norte: zona de Isiboro

En esta zona ya estamos en el límite de la cuenca paleozoica y, además, la erosión del Triásico fue muy fuerte. El Cretácico superior fue también erodado antes del Oligoceno. El Paleozoico se adelgaza hacia el este, y al este del anticlinal de Isiboro se encuentra directamente el Mesozoico sobre el basamento. Al oeste existen las rocas madre del Carbonífero inferior (Grupo Retama), del Devónico (Fms. Tomachi y Tequeje) y del Silúrico. El Pérmico no existe, sino que fue erodado antes del Jurásico. El Silúrico tiene en los afloramientos un potencial que puede ser bueno. Un valor inicial mínimo de S1+S2 de 6 mg HC/g parece realista. El Devónico tiene el potencial general S1+S2 inicial alrededor de 3 mg HC/g y no hay datos para la Fm. Toregua. Además, las estructuras están profundamente erodadas, hasta el Devónico, y los reservorios están aflorando, excepto en la estructura frontal de Isiboro. Por lo tanto, la zona parece poco prometedora.

Subandino Centro - Boomerang

El Silúrico tiene valores bastante altos y todavía no está sobremaduro en numerosos pozos (Santa Rosa We y 7, Platino, Sicuri, Yapacani-X5 ,..). Su espesor aumenta hacia el SW hasta llegar a 400 metros. Con un S1+S2 promedio de 5 mg HC/g, y 80 % de lutitas se deduce un SPI de 4 t/m².

El Devónico de las formaciones Limoncito y Boomerang tiene valores actuales de S2 hasta 10 mg HC/g pero el valor promedio está de 1.5 mg HC/g. Un potencial promedio inicial entre 6 y 8 mg HC/g parece realista en 75 % de las series. Las formaciones Copacabana y Toregua están ausentes en el Boomerang. El espesor del Devónico es muy variable debido al límite de la cuenca paleozoica y a la erosión triásica, y por eso es difícil definir un SPI para toda la zona. Este parámetro puede variar de 0.5 hasta 6 t/m² en función de la posición, y por lo tanto, cada estructura debe ser estudiada en detalle en términos tanto de riqueza de rocas madre como de edad de la estructuración. Por ejemplo, los pozos San Juan-X2 y Santa Rosa no han dado los mismos resultados, cuando los dos parecen ubicados sobre la misma fuente de migración. Esto fue interpretado en función de la edad de la estructuración por Baby *et al.* (1994b). San Juan sería una estructura más joven y entonces posterior a la migración, sin depósito reciente en la zona de drenaje y con erosión durante el Plio-cuaternario. Al contrario, Santa Rosa es el borde de la cuña y corresponde a una estructura mucho más antigua que se ha llenado al final del Mioceno.

En conclusión la zona tiene un potencial, pero que no es homogéneo, y cada *play* potencial tiene que ser estudiado con atención.

Las reservas probadas actuales muestran que la zona Subandina, y en especial el área del Boomerang, son esencialmente gasíferas. Los principales campos (Carrasco, Katari, Sirari, Víbora, Yapacaní) producen gas y condensado, aunque las rocas madre son de origen marino y no son propensas a la producción de gas. Atribuimos esto al alto nivel de maduración del Paleozoico inferior y al bajo potencial inicial de las rocas madre. El petróleo que se generó no ha sido expulsado, sino que permanece en la roca madre, donde continúa el proceso de soterramiento y maduración. Los compuestos más ligeros se formaron después y migraron a las estructuras andinas.

Chaco

El levantamiento del Alto de Izozog al inicio del Terciaro ha estructurado algunas zonas del antepaís que contienen *play* potencial, pero este levantamiento ha inducido un erosión fuerte que ha afectado hasta el Devónico en una zona grande. Por lo tanto, muchos de los reservorios (Devónico superior, Carbonífero y Cretácico) ahora no se encuentran y todos los pozos de Izozog

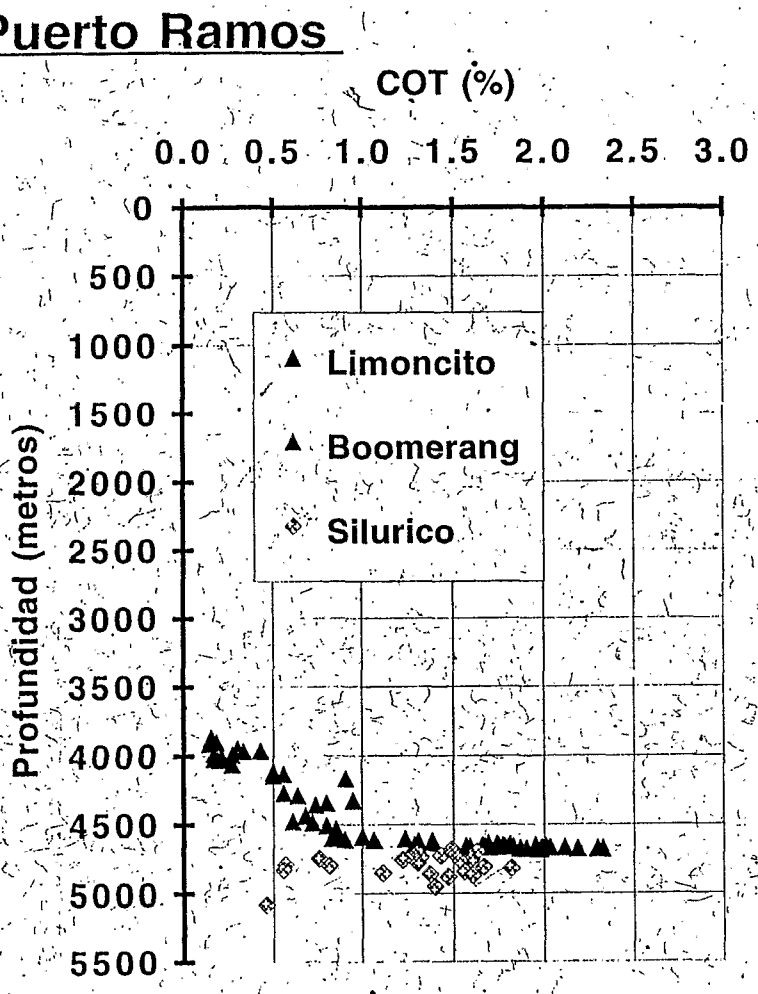


Fig. 13.– Pozo Puerto Ramos: variación del COT en función de la profundidad. En este pozo la Formación Roboré (areniscas del Devónico inferior) es muy reducida. La ventana de petróleo, basada tanto sobre los valores de vitrinita como sobre los de Tmax, está bastante baja (4500 metros) debido a la fuerte tasa de sedimentación Plio–cuaternaria (2650 metros, Fm Chaco). La zona más rica se sitúa en las lutitas de la Formación Boomerang, del Devónico inferior, inmediatamente encima del Silúrico (4680m).

Fig 13: *Geoquimical log from the Puerto Ramos well. The Robore Fm is rather thin, and overall the Lower Devonian is shaly. Based on vitrinite reflectance data and Tmax values, the oil window is 4500 m deep on this area due to the high current sedimentation rate. The Plio–quaternary deposit are 2650 meters thick. The organic richest zone is clearly the base of the Lower Devonian.*

resultaron secos. Los pozos al este del antepaís resultaron también secos, aunque los pozos Otuquis, Ravelo y Tucavaca muestran un potencial del Paleozoico equivalente, o mejor, que el del Subandino Sur. Se encontraron índices, pero sin valor económico, debido también a la falta de reservorio. En conclusión, el problema de la zona no es la ausencia de rocas madre, sino de rocas reservorio. Existen posibilidades de encontrar petróleo en la llanura buscando las zonas donde, como en Tinta, la erosión del Paleoceno no ha sido tan fuerte.

Subandino Sur

Al Sur, los rocas madre son mucho mas homogéneas. Todas la lutitas del Devónico y del Silúrico tienen algún potencial, el cual es bastante bajo, pero permanente, y su debilidad está en parte compensada por los espesores de las secuencias. Como ya hemos visto, la parte más rica en lutitas es la Formación Los Monos, 700 metros con la mitad de lutitas. El COT promedio es de 1.2% y el S1+S2 de 5 mg HC/g, el SPI correspondiente sería de 5 t/m². La Fm. Iquiri tiene más o menos el mismo potencial pero menos lutitas (valor promedio de 150 m). Para esta unidad se deduce un SPI de 1.5 t/m². Las Fms. Icla y Huamampampa presentan también un potencial en las lutitas, aunque un poco mas bajo. Con un valor de S1+S2 promedio de 4 mg HC/g, y 200 metros de lutitas, resulta un SPI de 2 t/m².

En esta zona, con los espesores que se conocen de Devónico (más de 2500 metros) y Carbonífero (más de 1000 metros), el Silúrico ya estaba maduro durante el Carbonífero, y por lo tanto no tiene influencia sobre el sistema petrolífero actual (Moretti *et al.*, 1995). El Carbonífero y el Cretácico no presentan ningún potencial.

Desde un punto de vista del *timing*, debido a las pocas variaciones de los espesores del Paleozoico y del Mezosoico en la zona, las historias de maduración son muy similares en los diferentes lugares: el Silúrico maduró durante el Carbonífero así como el Devónico inferior (Fms. Icla y Humampampa), que llega usualmente a un TR de 80% en el Triásico, las formaciones Los Monos e Iquiri quedándose con un nivel bajo, TR entre 30 y 0%. Este nivel es el que se encuentra actualmente en los anticlinales. En los sinclinales, el soterramiento aumentó durante el Terciario, y el Devónico superior maduró entre el Mioceno superior y la actualidad (deposición de las formaciones Tariquía, Guandacay y Emborozú). Desde un punto de vista del *timing* y de la riqueza de las rocas madre, casi todas la estructuras tienen el mismo

ORSTOM - BOLIVIE
DOCUMENTATION

potencial, menos las que corresponden a pliegues muy recientes con una propagación *out-of-sequence* sin incremento de la subsidencia (para todos los detalles sobre la historia de la maduración ver Moretti *et al.*, 1995).

El SPI total de la zona es entonces de 6.5 t/m². No hay que sumar el potencial del Silúrico ni del Devónico inferior que ya estaban sobremaduros antes de la formación de las trampas. Ese valor es ya bastante bueno según los criterios internacionales, Demaison & Huizinga (1991) pone el límite de valor pobre en 2 y bueno en 7 t/m², pero hay que mencionar que este parámetro (SPI) no tiene en cuenta la superficie del área de drenaje. Existen zonas con un SPI muy bajo que producen hidrocarburos, como la cuenca Austral al sur de la Argentina. Al contrario, en el Subandino sur, el área de drenaje de cada estructura es reducida debido al nivel alto de compresión y a la alta densidad de fallas. En conclusión, la probabilidad de encontrar grandes campos depende de las trampas y de las dimensiones de su área de drenaje.

La zona de Santa Cruz es un poco diferente porque los espesores del Terciario son muy reducidos. El nivel de madurez que se encontró en los pozos (La Copa y Matarál) y en afloramiento se puede explicar con el espesor de Paleozoico, y por lo tanto es una maduración antigua, antes de la erosión del Triásico. El único lugar donde se midió un nivel de maduración más alto es en el pozo de Espejos en el cual la Formación Los Monos está mucho más madura que en los afloramientos porque está ubicada bajo un cabalgamiento. En los afloramientos de la Angostura, la Formación Los Monos tiene una maduración equivalente a un TR de 30% lo que indica que el espesor del Terciario fue como máximo de 400 metros (Moretti *et al.*, 1995). Parece que esta zona estuvo bastante alta durante todo el Terciario, y en conclusión el *timing* de la maduración y su nivel actual no permiten que se llenen las trampas actuales. Además, debido a la erosión, muchos de los reservorios potenciales, como los del Carbonífero, ya afloran. La zona es, por lo tanto, muy poco prospectiva.

En el Subandino Sur hay muchos campos, con reservas muy limitadas, y también muchos índices de superficie. Todo esto se explica bien con la presencia de este gran espesor de Paleozoico sin ningún nivel verdaderamente rico. Como en el Boomerang, el nivel de madurez de los HC encontrados parece debido a la pobreza de la materia orgánica. Debido a la escasa generación de hidrocarburos, los HC livianos no son expulsados y salen sólo los más livianos cuando aumenta el nivel de madurez. Nunca se ha muestreado un petróleo correspondiente a una reflectancia de la vitrinita inferior a 1, mientras que se encuentran valores más bajos en las rocas madres. Los proyectos actuales de buscar reservorios más profundos en las areniscas de la Formación Huamampampa son claramente interesantes. Como muchas veces las lutitas de la Formación Los Monos sirven de nivel de despegue, las estructuras de superficie son bastante complejas y pequeñas. Pero se pueden esperar estructuras más grandes abajo, eventualmente con reservas de gas importantes, como en el norte de la Argentina.

CONCLUSION

Los análisis geoquímicos documentan cuatro tipos de rocas madre en la cuña sedimentaria paleozoica: la Formación Copacabana (Carbonífero superior-Pérmico inferior), la Formación Tomachi (Devónico superior), los depósitos Devónicos medio a inferior (Fms. Tequeje, Limoncito, Boomerang, Los Monos, Icla-Humampampa), y la sección Silúrica. Además, el Cretácico superior (Fms. Flora y El Molino) se encuentran localmente con un buen potencial.

En la cuenca Madre de Dios, la roca madre principal es la Formación Tomachi. Se trata de una roca madre muy rica, a la cual hay que añadir el potencial del Paleozoico inferior y medio. La cuenca es entonces muy prospectiva desde el punto de vista de las rocas madre, pero está poco estructurada.

En el norte del Subandino norte, se puede esperar encontrar la Formación Tomachi con casi la misma riqueza que al Norte, y la Formación Copacabana todavía con un buen potencial como más al sur. La zona, por lo tanto, tiene muchas perspectivas. En el centro del Subandino norte, en la zona de Lliquimuni, se encuentra buena roca madre en la Fm. Copacabana, y el Devónico superior podría también tener un potencial alto como en el norte. Hay trampas debidas a la estructuración del Subandino durante el Neógeno, y reservorios dentro del Paleoceno. En general, el Subandino norte es la zona más prospectiva de Bolivia y como todavía la exploración fue muy reducida, se puede ser optimista sobre el futuro.

En el Boomerang, el Pérmico y Carbonífero ya fueron erodados o no tienen potencial, el Devónico superior (Fm. Iquiri) tiene un potencial medio a bajo y entonces las rocas madre son el Devónico medio (Fms. Limoncito y Boomerang) y el Silúrico (Fm. El Carmen). Todas tienen un potencial bastante pobre y, por lo tanto, son económicamente interesantes sólamente cuando tienen un gran espesor. Todas se encuentran en posición y a un nivel de maduración adecuado para participar del sistema petrolífero actual. Para cada estructura, el *timing* de la estructuración debe ser estudiado en detalle.

En el Subandino sur, las rocas madre son todas las lutitas del Devónico (Fms. Iquiri, Los Monos, Huamampampa e Icla) y del Silúrico. La historia de la maduración es casi siempre positiva por las estructuras andinas. El "único" problema es por lo tanto encontrar trampas grandes con sello y área de drenaje importante. El estudio de las reservas probables de cada estructura necesitaría ahora de un estudio de la migración y de la calidad de los sellos. En zonas complejas como el Subandino se supone que las fallas juegan un papel mayor en la migración de los hidrocarburos, y la presencia de indicios de superficie a lo largo de muchas de ellas lo indica claramente. Sin embargo, no se ha hecho todavía una cuantificación de la influencia relativa de cada "modo de transporte": por falla o por migración a través de las capas porosas. Además, no se sabe si todas la fallas son fuente de migración o si se pueden definir sus características de permeabilidad. Otro problema conectado con la migración, sobre

Tabla 1: Riqueza de las rocas madre (SPI en t/m²) por cada subcuenca:

Sub-cuenca	Sil.	Dev	Dev Sup	Carb	Perm.	Cret.	Total
Madre de Dios	0	3	16	1	0	0	20
Madidi	0	3	*5 - 10*	1	*0 - 2*	1	*10 - 17*
Subandino-N	0	4	*3- 6*	*0.5*	7.5	0	15 - *18*
Boomerang *	0 - 4	0 - 6	0 - 3	0	0	0	0 - 13
Subandino Sur		5.5	1.5	0	0	0	7
Chaco	1 - 2	4.5	1.5	0	0	0	7 - 8

*Para el Boomerang, los valores dependen de la posición estructural en comparación con la erosión del Triásico.
Los valores en itálicas indican que los datos no permiten todavía establecer conclusiones porque no se conoce el extensión hacia el sur de la facies rica en materia orgánica del Devónico Superior de la cuenca Madre de Dios.

todo si se trata de reservorios del Devónico inferior, es la migración por abajo. Este fenómeno existe en todas las zonas con sobrepresión. En particular, cuando existen sobrepresiones en la roca madre, hay expulsión por descenso. En el Subandino, se ha mencionado sobrepresión en la Fm. Los Monos (Pérez, 1994), y habría que estudiar las posibilidades de llenar trampas dentro de la Fm. Huamampampa con hidrocarburos generados en la Fm. Los Monos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó por medio de un convenio de investigación entre YPFB y ORSTOM. Todos los datos son de la base de datos de YPFB. Agradecemos el CTP, por parte de los análisis de Rock Eval, y A. Dalenz y N. Liachenko por su ayuda.

REFERENCIAS

AGUILERA, E., 1995a. Análisis geoquímico de secciones del NE del Lago Titicaca. YPFB-*Informe técnico* CTP-LGQ-05-1045-95.

AGUILERA, E., 1995b. Análisis geoquímico de los pozos Pando-X1, Pando-X2 y Manuripi-X1. *YPFB-Informe técnico* CTP-LGQ-05-1047-95.

BABY, P., G.HERAIL, J.M.LOPEZ, O.LOPEZ, J.OLLER, J.PAREJA, T.SEMPERE & D.TUFIÑO, 1989. Structure de la zone Subandine de Bolivie: influence de la géométrie des séries sédimentaires anténorogéniques sur la propagation des chevauchements. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, Série II, 309 : 1717-1722.

BABY, P., G.HERAIL, R.SALINAS & T.SEMPERE, 1992. Geometric and kinematic evolution of passive roof duplexes deduced from cross section balancing: example from the foreland thrust system of the southern Bolivian subandean zone. *Tectonics*, 11 : 523-536.

BABY, P., B.GUILLIER, J.OLLER, G.HERAIL, G.MONTEMURRO, D.ZUBIETA, & M.SPECHT, 1993. Structural synthesis of the Bolivian Subandean zone, *in International Symposium on Andean Geodynamics*: ORSTOM, Série "Colloques et Séminaires" : 159-162.

BABY, P., M.SPECHT, J.OLLER, G.MONTEMURRO, B.COLLETTA & J.LETOUZEY, 1994a. The Boomerang-Chapare transfer zone (recent oil discovery trend in Bolivia): structural interpretation and experimental approach, *in* F. Roure ed., special publication *EAPG Congress, Moscou* (May 1992): Editions Technip.

BABY, P., I.MORETTI, B.GUILLIER, R.LIMACHI, E.MENDEZ, J.OLLER & M.SPECHT, 1994b. El sistema petrolero del subandino norte y centro. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia* : 86-105, Santa Cruz, Oct. 94.

BECCAR, G. & H.TOLEDO, 1990. Estratigrafía de detalle: área septentrional del Subandino norte. *Informe interno - YPFB* - DTXC - GXG.

BLOOMFIELD, K. & M.LITHERLAND, 1979. Resumen de la geología y potencial de minerales del área del Proyecto zona Sud. *Geobol/IGS*. Santa Cruz - Bolivia.

DEMAISON, G. & B.J.HUIZINGA, 1991. Genetic classification of Petroleum systems. *Bull. AAPG*, 75, 1626-1643.

ESPITALIE, J., G.DEROO & F.MARQUIS, 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Revue de l'Institut Français du Petrole*: 40 : 563-579 and 755-784.

FORBES, P. P.UNGERER, A.KUFFUS, F.RIIS & S.ENGGEN, 1991. Compositional modelling of petroleum generation and expulsion: *AAPG Bulletin*, 75 : 873-893.

GAYET, M., L.MARSHALL & T.SEMPERE, 1991. The mesozoic and paleocene vertebrates of Bolivia and their stratigraphic context: a review. Fósiles y Facies de Bolivia (I), Santa Cruz, *Revista Técnica de YPFB*. 12, (4) : 393-433.

GUBBELS, T. L., B.L.ISACKS & E.FARRAR, 1993. High-level surfaces, plateau uplift, and foreland development, Bolivian central Andes: *Geology*, 21 : 695-698.

ISAACSON, P.E. & E.DIAZ, 1995. (in press) Evidence for a Middle–Late Paleozoic foreland basin and significant paleolatitudinal shift, Central Andes (in A.J. Tankard, R.Suárez S. & H.J. Welsink, *Petroleum Basins of South America* : AAPG Memoir 62) : 231 –249.

LOPEZ PUGLIESSI, M., 1974. Correlación estratigráfica longitudinal de la faja subandina, entre las fronteras de Perú y Argentina. *Informe interno YPFB* (GXG-1906), Santa Cruz.

MARSHALL, L.G. & T.SEMPERE, 1991: The Eocene to Pleistocene vertebrates of Bolivia and their stratigraphic context: a review, *in* Fósiles y Facies de Bolivia (1) : *Revista Técnica de YPFB* (Santa Cruz), 12 (4) ; 631-652.

MONTEMURRO, G., 1994. Estratigrafía y ambiente sedimentario del Silúrico y Devónico en la cuenca del Chaco Boliviano. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia* : 151-160.

MORETTI, I., P.BABY E.MENDEZ & D.ZUBIETA, 1995. Petroleum potential of the SubAndean Zone from 18 to 22°S - Bolivia. Submitted to Petroleum Geosciences.

MUÑOS, N.E., 1989. Estudio geológico estratigráfico de las hojas Baquedano y Pampa Unión II – Región de Antofagasta Chile. – *Tesis Universidad de Chile, Santiago.*

OLLER, J. & T.SEMPERE, 1990. A fluvio-eolian sequence of probable middle Triassic-Jurassic age in both Andean and Subandean Bolivia, *in International Symposium on Andean Geodynamics*: ORSTOM, Série "Colloques et Séminaires", 237-240.

OLLER, J., 1992. Cuadro cronoestratigráfico de Bolivia: YPFB document, Santa Cruz, Bolivia.

PEREZ, E., 1994. Presiones anormales en la Formación Los Monos sus efectos. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia* : 520-539.

PEREZ, M., 1994. Informe palinológico N° 08-2727, *CTP-YPFB*, 3 p.

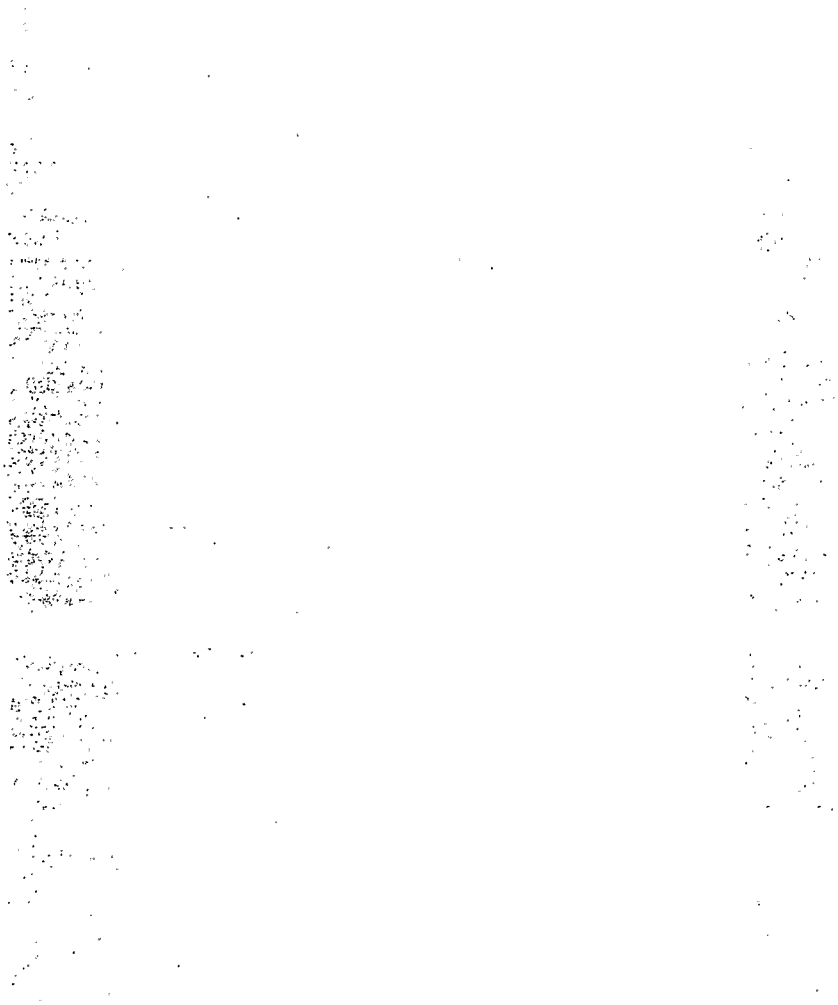
ROEDER, D., 1988. Andean-age structure of Eastern Cordillera (Province of La Paz, Bolivia); *Tectonics*, 5 : 23-39.

SEMPERE, T., 1990. Cuadros estratigráficos de Bolivia: propuestas nuevas: *Revista Técnica de YPFB* (Santa Cruz), 11 : 215-227.

SEMPERE, T., 1995. (in press) Phanerozoic evolution of Bolivia and adjacent regions, (in: A.J. Tankard, R. Suárez S. and H.J.Welsink, *Petroleum Basins of South America* : AAPG Memoir 62) : 207-230.

SEMPERE, T., G.HERAIL, J.OLLER & M.G.BONHOMME, 1990. Late Oligocene-Early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia: *Geology*, 18 : 946-949.

SHEFFELS, B., 1990. Lower bound on the amount of crustal shortening in the central Bolivian Andes: *Geology*, 18 : 812-815.

SOLER, P. & T.SEMPERE, 1993. Stratigraphie, géochimie et signification paléotectonique des roches volcaniques basiques mésozoïques des Andes Boliviennes: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 316, Série II : 777-784.

VERNET, R. & R.BOTELLO, 1975. Area de Madidi. Síntesis geológica, *Informe Interno Total Bolivie.*