



020017187

ORSTOM - BOLIVIE  
DOCUMENTATION

1994

# EVALUACION DEL POTENCIAL PETROLIFERO DEL ALTIPLANO DE BOLIVIA

ISABELLE MORETTI\* & OSCAR ARANIBAR \*\*

\* Convenio YPFB-ORSTOM, Casilla Postal 4875 - Santa Cruz,  
dirección actual IFP B.P. 311, 92506 Rueil-Malmaison, Francia

\*\* GXG-YPFB, Casilla Postal 1659 - Santa Cruz, Bolivia

## RESUMEN

Existen dos rocas madre principales en el Altiplano boliviano: el Paleozoico (Silúrico-Devónico) y la parte inferior de la Formación El Molino (Maastrichtiano). Esta última es poco potente y sólo presenta un buen potencial petrolero en la parte oriental del centro del Altiplano (región del Lago Poopó, Río Mulato) y en la Cordillera Oriental, entre 18 y 20° de latitud sur. Los parámetros tan variables que se obtienen en superficie podrían indicar que su potencial no es homogéneo. En la parte central del Altiplano existe otra roca madre cretácica que corresponde a las calizas y margas de la base de la Formación Chaunaca (Santoniano-Campaniano). Esta formación no está siempre presente y el espesor máximo de la parte roca madre es alrededor de 5 metros. Hacia el sur del Altiplano, el Cretácico se adelgaza y su potencial como roca madre decrece. Al oeste sólo aflora el Terciario y no existe por el momento ningún dato sobre las rocas madre en superficie o subsuelo. Alrededor del Lago Titicaca existen rocas madre pérmicas y carboníferas cuyo espesor aumenta hacia el norte, estando erosionadas hacia el sur. Puede que estas rocas estén presentes en la parte oeste del Altiplano norte, ya que están presentes al norte de Chile, pero los datos con los que se cuenta actualmente no permiten llegar a esta conclusión en la parte boliviana. El Silúrico y el Devónico, cuando están presentes, tienen el mismo potencial que en el Subandino (TOC inicial alrededor de 1.5%), pero con menor espesor. No existen datos sobre su presencia al oeste, y el Devónico no está presente en la región de Vilque, al este de la Falla Uyuni-Khenayani, aunque se presume la presencia del Devónico al oeste de la mencionada falla. Las areniscas del Cretácico superior-Terciario inferior son consideradas como el mejor reservorio. Las trampas son debidas a la estructuración neógena, la cual empieza con la apertura de hemigrábenes en un contexto de transtensión del Eoceno al Oligoceno medio. Las formaciones Potoco y Tiahuanacu, depositadas durante esta fase, tienen un espesor que puede ser bastante potente, hasta 4.000 metros. La compresión no afecta al Altiplano antes del Oligoceno terminal y empieza en la zona de la actual Cordillera Oriental, lo que induce un gran aporte de conglomerados (Fm. Coniri). La compresión migró después, del Mioceno al actual, hacia el oeste, y produjo la inversión de los hemigrábenes iniciales. La trampas relacionadas con las primeras fases son las más prospectivas porque el soterramiento se mantuvo en las cuencas. La fase actual de fuerte inversión-compresión que tiene lugar desde el Plioceno es contemporánea con la erosión a lo largo de toda la franja este del Altiplano, sin aumento de la profundidad de soterramiento. Las estructuras relacionadas con esta fase son en muchos casos posteriores a la migración de los hidrocarburos, y por lo tanto implican un mayor riesgo.

## ABSTRACT

The two main source rocks on the Bolivian Altiplano are the Paleozoic (Silurian + Devonian) and the lower part of the upper Cretaceous (El Molino Fm., Maastrichtian to Danian). The very small number of wells (5) does not allow to estimate the potential of the different source rocks. All the geochemical part of this study is thus based on outcrop data.

### Source rock:

The Lower Paleozoic contains some rich organic units. It is overmature on the Eastern Cordillera as well as in the Sub Andean Zone, but may eventually play some role on the western part of the Altiplano, where the Middle to Upper Paleozoic is supposed to have been thinner, or missing. The Middle Paleozoic is the main source rock on the Sub Andean Zone and, at least on the eastern part of the Altiplano, shows similar facies to the ones known on the Sub Andean Zone. It is a marine source rock with a rather low but constant petroleum potential (Initial S1+S2 around 5 mg HC/g). The main doubtness concerning the influence of this source rock is its thickness on the Altiplano. The Silurian and Devonian reach a total thickness of up to 4.000 meters in the Sub Andean Zone, as opposed to the Altiplano, which may correspond more or less to the western border of the Silurian-Devonian foreland basin.

The Permian and Carboniferous are present to the north, around Lake Titicaca, but are missing to the south due to pre-Cretaceous erosion. The Lower Carboniferous is characterized by a progradational deltaic sequence and does not present a high potential except very locally. The Upper Carboniferous and Lower Permian Copacabana Fm. is an excellent source-rock on the northern part of the Sub Andean Zone (Liquimuni area) and, by reputation, it is the source rock of the Pirín field in Peru, but organically rich and thick facies have not been recognized in the Bolivian Altiplano area, where the Copacabana Fm. is mainly calcareous.

REVISTA TECNICA DE YPFB, 15 (3-4) : 327 - 352, DICIEMBRE 1994 - COCHABAMBA, BOLIVIA

Fonds Documentaire IRD



010023211

Fonds Documentaire IRD

Cote: BX23211

Ex: 000

The El Molino Fm. could locally present very high potential (S2 up to 20 mg HC/g), but the data are rather inhomogeneous. The best values are from the Eastern Cordillera, where the Cretaceous is immature. On the Altiplano, Cretaceous outcrops are numerous on the eastern part. Westward, only the Tertiary is outcropping, and a lot of uncertainties remain on the facies and even on the units existing on subsurface.

#### *Tectonic setting*

Pacific subduction started in the early Mesozoic, first in an extensional context (various backarc basins may be recognized from Jurassic to Cretaceous over all the margin from Venezuela to south Chile), and then in a compressional context. The change from extension to compression is not synchronous along the margin, and in Bolivia is late compared with neighbouring regions. The Cretaceous is still extensional and the Paleogene is characterized by large and deep half-grabens which may correspond to strike-slip faults. The first definitely inverse faulting started at the end of the Oligocene (27 My), with the thrusting and uplift on the modern Eastern Cordillera. This date also corresponds to the formation of the Altiplano as an isolated basin, limited to the east by the Eastern Cordillera and to the west by the Western Cordillera, formed by the Andean magmatic arc. The erosion of the Eastern Cordillera induced conglomeratic deposits along the east (Coniri Fm.) when the western part is mainly volcano-detritic. The previously formed half-grabens were then progressively inverted in the Altiplano and subsidence continued in some basins. This phase of compression took place at the end of the Miocene, and is contemporaneous with the eastward migration of the compressional front of the Sub Andean Zone, where the thrusts are dated from 14 Ma to recent. The current phase starting in the Pliocene is also compressive, and led to the uplift and strong erosion of the eastern part of the Altiplano. Very rapid vertical and horizontal movements due to deep processes (crustal thickening and lithospheric thinning) were accommodated by high-angle faults.

#### *Timing of HC generation and migration*

Supposing that the Middle Paleozoic source rock did not mature during the Late Paleozoic, the generation of HC from both Paleozoic and Cretaceous source rocks started in the Oligocene, at the end of the Potoco-Tiahuanacu deposits, and it is mainly active during Miocene time. The speculated reservoirs are Cretaceous to early Tertiary, so the traps are all connected to the Neogene evolution of the area. Recent structures (end of Miocene to present) are risky because they are more recent than the increase of subsidence.

#### *Current exploration*

The Altiplano is a frontier zone where only 5 wells have been drilled, mainly between 1970 and 1976. Three of them were badly located (salt domes or basement structures). The southern one (Vilque) was drilled on a Paleozoic high, and showed that the Cretaceous is very thin and not organically rich on this part. Large quantities of methane and nitrogen have been reported. The methane seems to indicate the presence of an overmature source rock, and the nitrogen has not been explained. The northern well, San Andrés de Machaca, is also dry and does not record any source-rock potential. The Precambrian basement has been found directly under a sandy Cretaceous, leading to very negative conclusions for the northwestern part of the Altiplano. The oil seeps are all on the eastern part, except for the Rio Mauri one, and their origin is still debated.

#### *Conclusions*

From a structural point of view, the Altiplano may be divided in two parts. The eastern part is thrustured by the Eastern Cordillera and affected by strong compressional features. The western part is characterized by Early Tertiary deep half-grabens that may still be recognized and have been slightly inverted during the Miocene. Eastward, many of the structures involved evaporites from the Cretaceous and Early Paleogene, as can be seen on outcrops and in numerous seismic lines. From a geochemical point of view, the eastern part is rather well known: Paleozoic source rocks exist from north to south (to the Uyuni-Khenayani Fault) and the Cretaceous (El Molino & Chaunaca Fms.) presents an excellent potential. Nevertheless, the Chaunaca Fm. is too thin (5 meters of source rock) for an active participation to the petroleum system, and the true thickness of source rock in the El Molino Fm. is still poorly known (from 30 to 100 meters). To the north, the Permian and Carboniferous source rocks are present, but are also very thin, and Cretaceous outcrops do not show any high HC potential. To the south, the same fact has been recorded: the El Molino Fm. reduces its potential and becomes thinner and more sandy. Eastward, everything is speculative and there is no proven source rock. Hopefully, a new well on this area will allow a better knowledge of the area on the coming months.

From a timing point of view, the best structures are the oldest ones, and this points to the highest part of the Early Paleogene half-grabens (as Santa Lucía, to the west), or the first compressive structures related to the Late Oligocene phase (which are numerous in the Poopo Lake area).

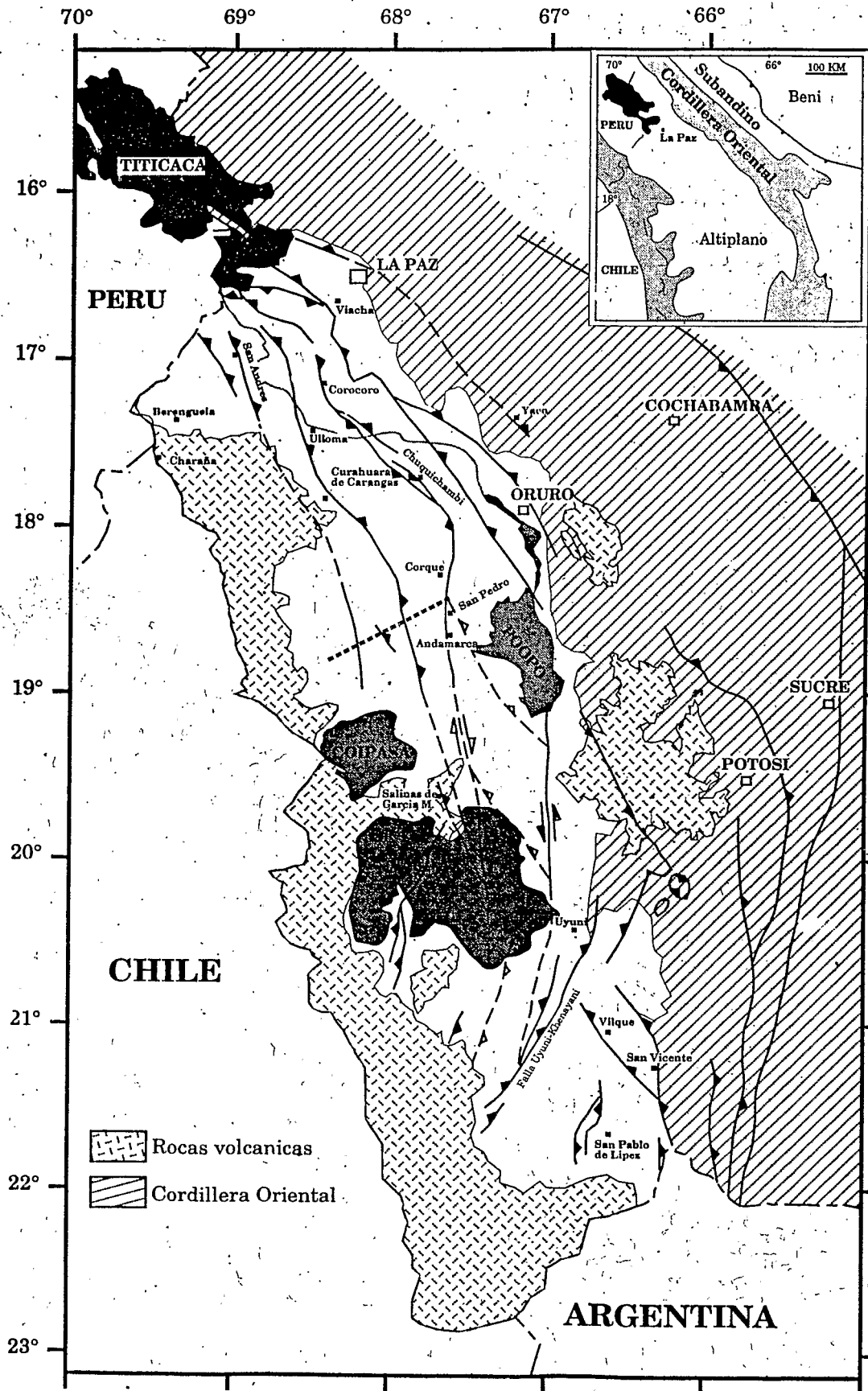


Fig. 1.- Mapa tectónico del Altiplano boliviano. Tectonic map of the Bolivian Altiplano.

# COLUMNA GENERALIZADA

## CUENCA ALTIPLANO - BORDE OESTE CORDILLERA ORIENTAL

SISTEMA	SERIE	FORMACION	SUR		CENTRO		NORTE		
			LITOLOGIA	ESPESOR (m)	LITOLOGIA	ESPESOR (m)	LITOLOGIA	ESPESOR (m)	
NEOGENO	PLIOCENO	Chocaya / Quehua Mauri / Umala / Frailes		200-900		-500		?	
	MIOCENO SUPERIOR	Pomata				-200			
	MIOCENO MEDIO	Rosapata Toba Ulloma Caquiviri				-1000 1000-3000			
PALEOGENO	OLIGOCENO MEDIO	San Vicente / Tambillo / Coniri (Azurita-Huayllapucara) / Peñas		1500-2500		-2500		3000	
	OLIGOCENO INFERIOR	Potoco / Tihuanacu / Turca Cayara / Tusque		1200-2300		1000-3000			
	EOCENO			10-20		30-150		100-150	
	PALEOCENO	Santa Lucia		40-150		100-500			
CRETACICO	SUPERIOR	MAASTRICHTIANO		40-400		200-700		200-400	
		CAMPANIANO SANTONIANO	Coroma Chaunaca		100-300		50 200-400		90-260
		CONIACIANO TURONIANO	Aroifilla		15-250		200-300		30-50
	INFERIOR	CENOMANIANO	Miraflores / Avavacas Tarapaya Kosmina				10-30 200-1200		10-35 50-200
			Condo				35		500
			La Puerta / Macha				30-40		200-450
JURASICO	?	?						100-200	
TRIASICO	?	Tiquina							
PERMICO	INFERIOR	San Pablo Copacabana Yaurichambi						300-1000	
	SUPERIOR								
CARBONIFERO	INFERIOR	Siripaca Kasa Cumana						200-1200	
	SUPERIOR								
DEVONICO		Colpacuchos Belén & Icla Vila Vila		>50 -900		100-200		200-2200 200-1500 300-1000	
		Catavi		100-1500					
		Uncu Canconiri		1000-2000 500-1000		?		?	
ORDOVICICO		Indiferenciado		-2000					
CAMBRICO PRECAMBRICO		Chilla San Andres							

INTRODUCCION

La exploración petrolífera en el Altiplano ha sido realizada en dos etapas separadas por casi 10 años. Después de una actividad de perforación bastante activa entre los años 70 y 75 de YPFB, Sun Oil, Superior Oil y Tesoro Oil, con resultados negativos, la exploración se reanudó en 1984 con otras compañías (YPFB, y después Exxon y Phillips) y nuevos conceptos. Uno de ellos es la geoquímica, que implica la cuantificación de la riqueza y el modelaje de la evolución de cada roca madre. Este artículo es la síntesis de los últimos trabajos de recopilación, interpretación y modelaje de datos geoquímicos y geodinámicos en la zona del Altiplano.

CONTEXTO GEOLOGICO

El Altiplano es, como su mismo nombre indica, una llanura alta que constituye una de las principales estructuras de los Andes Centrales. Su altitud media es de alrededor de 4.000 m; su anchura es mayor de 200 km, y su longitud es de alrededor de 2.000 km. Está asociado al codo de la cadena montañosa de los Andes, y se extiende aproximadamente entre 14 y 27° S (Fig. 1), desde el sur de Perú al norte de Argentina (Puna). La mayor parte del Altiplano se encuentra dentro de Bolivia, donde forma, entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental, una enorme depresión en la que se acumulan depósitos cenozoicos (hasta 10.000 m). La Cordillera Occidental (frontera con Chile) está compuesta por una serie de volcanes cuyas lavas han cubierto prácticamente todo el sustrato. La Cordillera Oriental está compuesta por importantes cabalgamientos que afectan a todas las series, así como algunos macizos intrusivos (Cordillera Real). Un parte de estos intrusivos son triásicos y llegaron a la superficie recientemente debido a la erosión (Illimani y Quimsacruz). Debido a la erosión, en gran parte de la Cordillera Oriental aflora mayormente el Paleozoico inferior (Ordovícico y Silúrico), pero existen remanentes del Paleozoico superior (Carbonífero y Pérmico) y de Cretácico. Algunas cuencas intramontañas neógenas han sido también preservadas (La Paz, Yaco, Luribay ...).

Potencial petrolífero

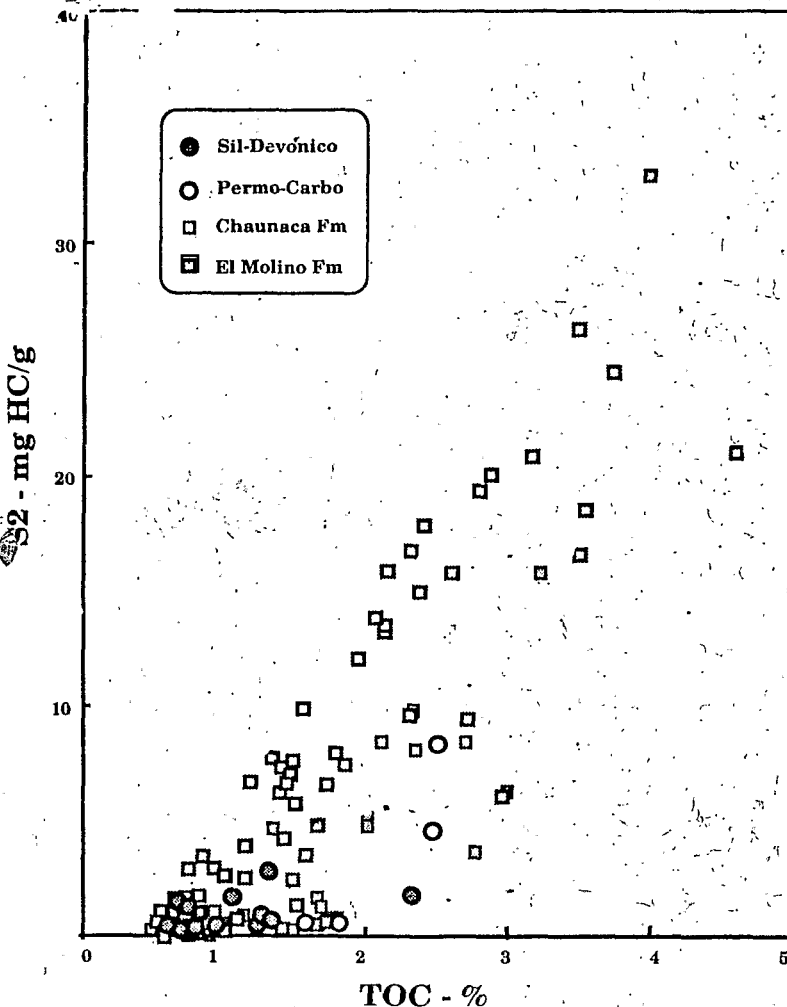


Fig. 3.- Datos geoquímicos: S2 versus COT. Geochemical data : S2 versus TOC

Este estudio trata sobre el potencial petrolífero del Altiplano y los modelos de la estructuración e historia de la geología de la zona, que serán resumidos con el objetivo de cuantificar la historia de la maduración de las rocas madre. En Bolivia, los datos de campo y subsuelo indican un acortamiento importante que afectó al Subandino, la Cordillera Oriental y al Altiplano. Hay numerosos estudios que describen estos acortamientos, entre los que se incluyen: Röeder (1988), Baby *et al.* (1989a, 1992a, 1992b, 1993), Heraill *et al.* (1990), Sheffels (1990) y Rochat *et al.* (1995). Los Andes Centrales cabalgan sobre la placa brasileña con un acortamiento no menor a 250 km, que se inició por lo menos hace 27 Ma (Sempere *et al.*, 1990a). Al oeste, la subducción pacífica y, por tanto, la Cordillera Occidental, son más antiguas, presumiblemente del Triásico.

Durante el Cretácico no existía el Altiplano. En su lugar había una cuenca de trasarco, y el paso a un régimen compresivo se efectuó en el límite Turoniano-Coniaciano en Perú y Ecuador (Jaillard, 1994; Sempere, 1994). La historia eocena a actual se sitúa en un contexto compresivo o/ y transpresivo, con una tasa de sedimentación alta. Se pueden definir cuatro fases principales, durante las cuales los eventos

compresivos-erosivos y transpresivos-sedimentarios son más o menos activos. El Altiplano se formó como una cuenca intramontañosa cerrada a fines del Oligoceno, al mismo tiempo que la Cordillera Oriental.

Desde el punto de vista geofísico, el Altiplano se caracteriza por una corteza actualmente espesa de 70 km (James, 1970; Wigger *et al.*, 1994). Los nuevos datos de sismología indican que no hay acreción magmática a la base de la corteza (Dorbath *et al.*, 1993). Por otro lado, estos datos indican un límite bien marcado entre la Cordillera Oriental y el Altiplano, que podría corresponder con un cabalgamiento a escala de la corteza. Una de las incertidumbres es la edad de este incremento de espesor de la corteza, y otra es la constancia de la profundidad del Moho. Los estudios de trazas de fisión en los batolitos de la Cordillera Oriental (área de La Paz) permitieron cuantificar la velocidad media de levantamiento de la cadena en 0.3 mm/a (+/- 0.1) para los últimos 10 Ma (Crough, 1983), pero puede que sea mucho mayor. Nuevos datos sobre el Illimani muestran una velocidad promedio de 1 mm/a desde el emplazamiento de este intrusivo en el Mioceno superior (M. Moisy, comunicación personal). Este levantamiento afecta a una zona más amplia que el Altiplano boliviano, y se extiende hacia el oeste hasta la parte chilena, lo cual muestra que se trata de un fenómeno activo debido a causas profundas, tal vez al adelgazamiento de la litósfera.

#### ESTRATIGRAFIA Y SEDIMENTOLOGIA

Las series sedimentarias que están presentes en el Altiplano frecuentemente muestran discontinuidades debidas a importantes periodos de erosión. La columna estratigráfica general de la figura 2 resume la totalidad de las series encontradas, así como los periodos de erosión. En muchos lugares falta parte de las series debido a la erosión, y la parte oeste del Altiplano, que está recubierta por sedimentos recientes volcánodetríticos, es poco conocida. Lo que se puede especular sobre esta zona será descrito en un párrafo más adelante.

##### Basamento

El basamento precámbrico es conocido al oeste del Altiplano, donde aflora en el Cerro Uyarani (1859 My ± 200; Troeng *et al.*, 1994). Al norte se cree que existe en el Cerro Chilla, donde se presenta como una serie de basaltos (presencia de "pillow lavas") y una "melange" intensamente deformada de clastos de basalto y de granito en una matriz clorítica (Witschard, 1992). Esta serie está recubierta en discordancia por el Cretácico, pero hay que mencionar que este afloramiento no ha sido todavía datado y puede que sea mucho más reciente (Paleozoico inferior?; Soler, comunicación personal). Sin embargo, su litología y facies son similares a la Fm. Puncoviscana del noroeste argentino. El

Proterozoico fué también perforado en el pozo San Andrés de Machaca-X2, a una profundidad de 2744 metros. Tiene un edad de 1050 ± 100 My, y fue afectado por un evento metamórfico en el Cámbrico medio-superior (530 ± 30 Ma; Lehmann, 1978). Estas rocas están también cubiertas directamente por el Cretácico superior.

##### Paleozoico

De forma global, los sedimentos paleozoicos han sido erosionados progresivamente hacia al sur (figura 2) y están recubiertos, en discordancia angular, por sedimentos mesozoicos y cenozoicos.

##### • Ordovícico

Está compuesto por un conjunto de secuencias marinas depositadas en una cuenca extensiva tipo tras-arco (Bahlburg & Breitkreuz, 1991; Sempere, 1994), que posteriormente se cierra y evoluciona hasta una cuenca de antepaís (Montemurro, 1992; Sempere, 1994). Esta serie detrítica se presenta en forma de bancos de areniscas micáceas y cuarcíticas, con raras intercalaciones de pizarras poco potentes. Aflora principalmente en la Cordillera Oriental, donde su potencia alcanza los 5.000 m. Su presencia bajo los sedimentos terciarios del Altiplano norte y centro es hipotética. En el Altiplano sur aflora en Pululus y a lo largo de la falla Uyuni-Khenayani.

##### • Silúrico-Devónico

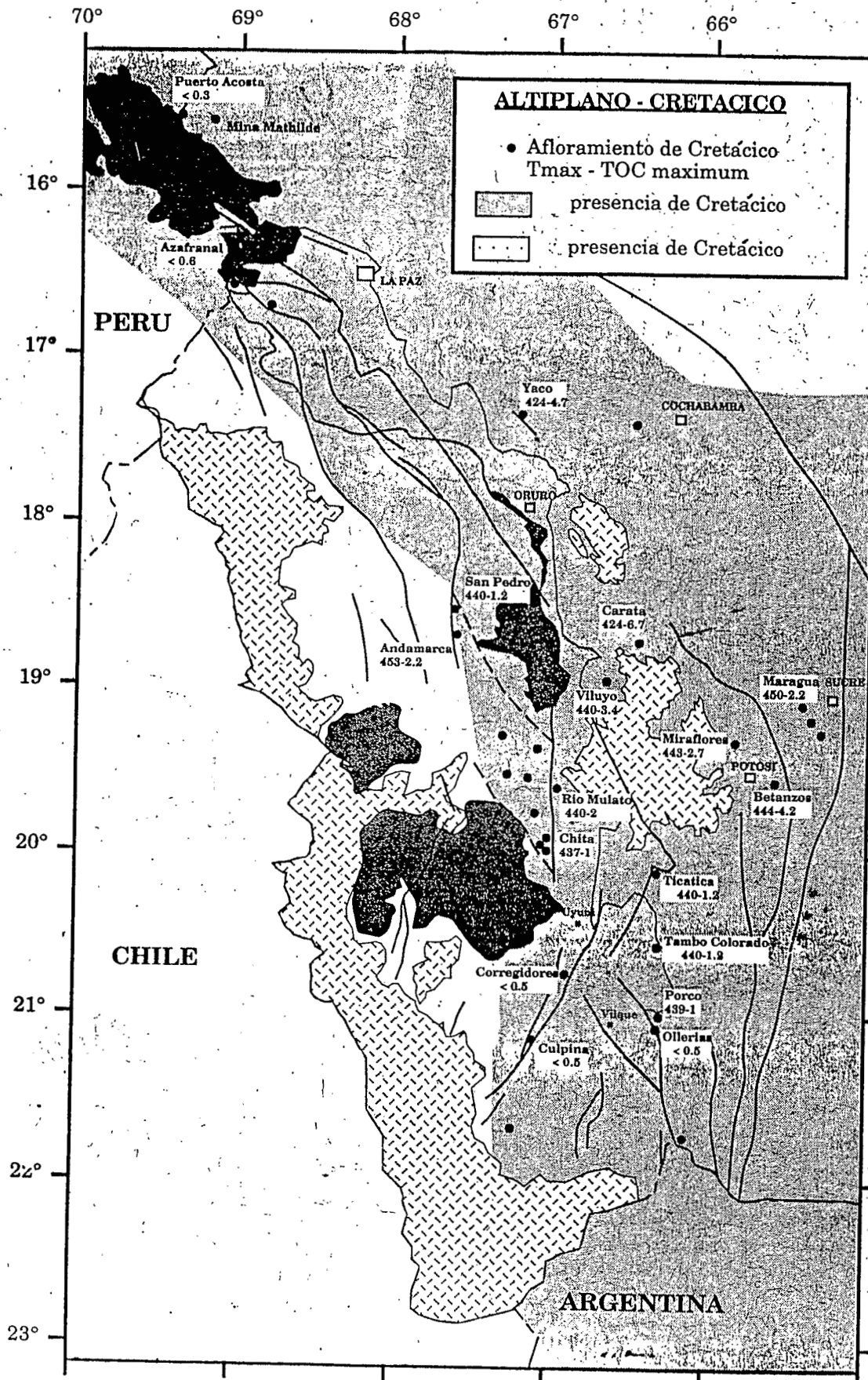
Está formado por un serie detrítica que comienza con depósitos resedimentados y glaciogénicos (Fm. Cancañiri), precedidos por una profundización rápida de la cuenca, y seguidos por cuatro secuencias de plataforma marina que progresivamente tienen más influencia de la costa. Se caracteriza por una alternancia de niveles de areniscas y de lutitas favorecen el desarrollo de niveles de despegue. Los niveles de lutitas de las cuatro secuencias de plataforma marina pueden ser roca madre, como es el caso en el Subandino. Los bordes de la cuenca paleozoica son conocidos al este, más o menos siguiendo el límite actual del escudo durante el Silúrico, y más al oeste (frontera actual con el Brasil) durante el Devónico (Montemurro, 1994). Pero del otro lado, al oeste, la posición del borde de la cuenca es todavía desconocida.

##### • Carbonífero-Pérmico inferior

El Carbonífero inferior (Grupo Ambo) reposa en concordancia sobre el Devónico, mientras que el Carbonífero superior y Pérmico inferior reposan en discordancia de carácter erosivo, sobre diferentes unidades del Carbonífero inferior, Devónico, e

Fig. 4.- Mapa de los afloramientos de roca madre del Cretácico con Tmax medio y COT más alto, y extensión aproximada de los depósitos. Map of the Cretaceous outcrops where geochemical data are available. The dashed area indicates respectively where the presence of Cretaceous source rock on subsurface is proved, the light shaded area is where it is hypothetical. The Tmax is an average value for the outcrops representing the maturity level. The TOC is the best value found on the outcrops.





incluso Silúrico. La serie comienza con depósitos resedimentados y glaciogénicos (diamictitas), seguidos por una serie siliciclástica de plataforma marina (lutitas y areniscas), que progresivamente tiene más influencia de la costa por progradación deltaica (Díaz, 1991). Se caracteriza por la presencia, en su parte superior, de calizas de plataforma intercaladas con areniscas, lutitas negras y tobas verdes hacia el tope. Los sedimentos carboníferos y pérmicos afloran únicamente en la parte norte del Altiplano, alrededor del lago Titicaca, y están erosionados más al sur.

#### Mesozoico

##### • Triásico-Jurásico

La parte inferior está representada por la Formación Tiquina, que se compone de areniscas rojas, conglomerados y coladas de lava basáltica. Esta serie detrítica granocreciente reposa en discordancia erosiva sobre la Formación Copacabana. La Formación Tiquina representa el estado inicial de un "rifting" que aborja en el Jurásico inferior (Sempere, 1990b), apareciendo entonces los depósitos arenosos fluvio-eólicos de la Formación Ravelo. La Formación Tiquina aflora únicamente al borde del lago Titicaca. Al igual que el Pérmico y Carbonífero, ésta unidad desaparece al sur.

##### • Kimmeridgiano? -Paleoceno

Esta serie sedimentaria, que reposa en discordancia sobre el Jurásico, el Triásico, el Paleozoico o el Precámbrico, se conoce clásicamente con el nombre de Grupo Puca. La estratigrafía, sedimentología y contexto tectónico de estos depósitos han sido sintetizados recientemente por Sempere (1994). La descripción siguiente es un resumen de este trabajo.

La serie cretácica de Bolivia está dividida en 3 asociaciones sedimentarias limitadas por discontinuidades:

##### *Kimmeridgiano? -Albiano*

Esta unidad sedimentaria, que se encuentra en discordancia sobre el Mesozoico inferior o el Paleozoico, está compuesta de conglomerados y de areniscas rojas sin fósiles (formaciones Condo, Kosmina, Sucre, La Puerta y Tarapaya), y depositadas en hemigrábenes. Estos depósitos registraron un evento extensivo de gran escala (fase "Araucana"), que se atenuó progresivamente durante el Albiano.

##### *Cenomaniano-Turoniano*

Esta segunda unidad sedimentaria (Fm. Miraflores), que se caracteriza por un espesor reducido y constante (20-30 m), constituye un excelente nivel guía. Está formada por calizas y margas marinas fosilíferas que han sido depositadas en un medio

tectónico estable. El único evento registrado en estos depósitos corresponde a la transgresión cenomaniana-turoniana. Esta formación se desarrolla solamente hasta la latitud de Río Mulatos, TicaTica y Río Yura donde ya se encuentran facies de borde (Formación Yura).

##### *Coniaciano-Paleoceno*

Esta es la serie sedimentaria de más espesor (200-1200 m). Está constituida principalmente por pelitas rojas, con algunos tramos de margas grises y calizas fosilíferas, así como cuerpos evaporíticos. La discontinuidad sedimentaria que separa esta unidad de la anterior corresponde a un cambio de facies (de calizas a pelitas rojas). Localmente existe erosión de las calizas subyacentes (Fm. Miraflores). Estos sedimentos han sido depositados en la parte oriental (distal) de una cuenca de antepaís de los paleo-Andes, debido al establecimiento de condiciones compresivas en el margen andino, aproximadamente en el límite Turoniano-Coniaciano (Jaillard, 1994; Sempere, 1994). En esta serie sedimentaria se encuentran los principales niveles de roca madre del Altiplano. Por tanto, a continuación se describen detalladamente cada una de las formaciones:

##### *Formación Aroifilla (Coniaciano)*

Está compuesta por lutitas rojas con algunas intercalaciones de evaporitas, depositadas en un ambiente aluvial y lacustre.

##### *Formación Chaunaca (Santoniano-Campaniano)*

La base de esta formación está compuesta por niveles fosilíferos de margas grises, calizas, lutitas negras y dolomías amarillas (Foto 3a). Esta parte de la formación, que contiene excelentes niveles de rocas madre; tiene un espesor de hasta 30 m. y está recubierta por lutitas rojas. En general, el ambiente de deposición es aluvial a lacustre, aunque las calizas de la base de la formación podrían tener origen marino (¿posible transgresión?). En el centro del Altiplano, la Formación Chaunaca presenta areniscas por encima (Fm. Coroma) debido a cambio lateral de facies. Localmente se pueden encontrar, en la parte superior de la formación, niveles calcáreos y margosos similares a los de la base, pero de granulometría más fina.

##### *Formación El Molino (Maastrichtiano-Daniano)*

Está compuesta por tres grandes secuencias transgresivo-regresivas (inferior, media, superior) que están constituidas por margas y pelitas verdes (predominantemente) y negras, con intercalaciones de niveles delgados de calizas. Gaillet *et al.* (1993) describen detalladamente estos depósitos y su medio sedimentario, que es marino. Hay muchas discusiones sobre este medio porque existe también indicios de un ambiente lacustre ligeramente salino. La Formación El Molino se ha depositado

Fig. 5.- Mapa de los afloramientos de roca madre del Pérmico y Carbonífero, y extensión aproximada de los depósitos (según Díaz, 1994). Map showing the extension of the Permian and Carboniferous facies, the grey part is where these series exist on surface or subsurface, the white part indicates where they are missing, and the very light shaded one where there is no yet the data to conclude.



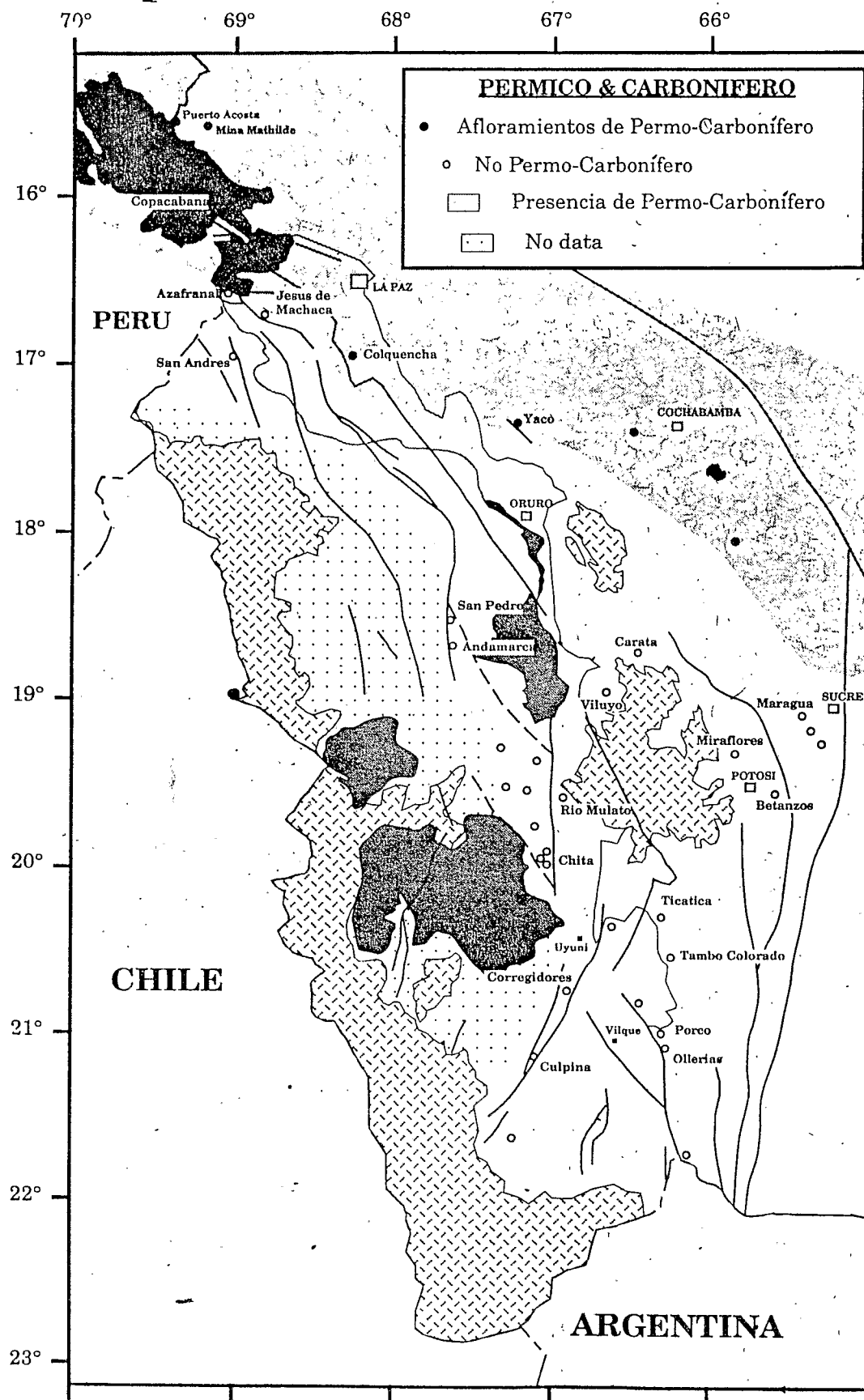


FIG. 5.

durante 10 Ma, y por lo tanto la alternancia de los dos ambientes no es extraña. En la parte inferior, las facies transgresivas están más desarrolladas, dando lugar a los mejores niveles de rocas madre.

#### Formación Santa Lucía (Daniano-Thonetiano)

La Formación El Molino pasa progresivamente a la Formación Santa Lucía que está compuesta de pelitas rojas claramente continentales.

#### Cenozoico

El Cenozoico está compuesto de series detríticas continentales. Un gran número de formaciones sedimentarias fueron definidas en el Altiplano en función de sus facies, más que de su estratigrafía (Meyer & Murillo, 1961; Ascariunz, 1973; Cherroni, 1974). Estudios recientes (Lavenu *et al.*, 1986; Sempere, 1990a, 1990b; Marshall *et al.*, 1992) han redefinido la estratigrafía y nos han permitido reagrupar las numerosas formaciones definidas inicialmente en cuatro grandes secuencias sedimentarias. Cada una de ellas se caracteriza por variaciones de facies y cambios en el régimen tectónico. El Altiplano se individualizó durante la deposición de estas cuatro megasecuencias sedimentarias:

#### • Megasecuencia Eoceno-Oligoceno inferior

Comienza con las areniscas de la Formación Cayara - las cuales se consideran el mejor reservorio del Altiplano - que reposan en discordancia erosiva y localmente angular (Marocco *et al.*, 1987) sobre la Formación Santa Lucía (Paleoceno). Encima se encuentra la Formación Potoco (llamada también Formación Tiahuanacu en el norte), que comienza generalmente con lutitas, evaporitas y areniscas rojas, y evoluciona a depósitos conglomeráticos. El espesor máximo de esta megasecuencia, medido con sismica, es del orden de 5.000 m en el sinclinal de Corque-Rosapata. La datación radiométrica efectuada en las facies superiores de la Formación Potoco le confieren una edad de  $29,2 \pm 0,8$  Ma y de  $29,6 \pm 0,8$  Ma (Swanson *et al.*, 1987). La edad de la base de esta formación se ha estimado en 50 Ma (Sempere *et al.*, 1990a).

#### • Megasecuencia Oligoceno-Mioceno

Está formada por las formaciones Coniri, Kollu Kollu, Berenguela y Mauri 1 a 5, al norte, y por la Formación San Vicente, al sur. Para simplificar, decidimos utilizar el nombre de formación Coniri (s.l.) para designar a toda esta megasecuencia que sísmicamente es homogénea, y que comienza con la aparición de conglomerados. Hacia el centro del Altiplano, el paso de la megasecuencia Eoceno-Oligoceno inferior (Fm. Potoco) a la megasecuencia Oligoceno-Mioceno (fm. Coniri, s.l.) es transicional, mientras que en el borde oriental (Cordillera Oriental)

la base de los conglomerados de la Fm. Coniri corresponde a una discordancia erosiva localmente angular. Esta discordancia progresiva será tratada posteriormente en el apartado sobre la evolución tectonosedimentaria. Sobre el borde oriental del Altiplano los conglomerados de la base de la Fm. Coniri están compuestos por clastos de rocas paleozoicas procedentes de la Cordillera Oriental. Hacia el centro, los sedimentos son menos gruesos, casi arenosos. Por el contrario, hacia el oeste (región de Turco), los conglomerados están compuestos de gravas de granito rojo y de gneiss con granates procedentes probablemente de un paleoborde occidental. El espesor máximo de esta megasecuencia es aproximadamente de 2.500 m. La base de la Fm. Coniri fue datada en  $25,5 \pm 1,7$  Ma (Sempere *et al.*, 1990). Las medidas radiométricas de la base de la formación le confieren una edad similar de 25,6 Ma (Everden *et al.*, 1977) y  $25,2 \pm 1$  Ma (Lavenu, 1986).

#### • Megasecuencia Mioceno medio-superior

Se caracteriza por importantes variaciones laterales de facies. Comienza con areniscas y lutitas beige con pequeños niveles conglomeráticos. A continuación se encuentran limolitas, lutitas y evaporitas, y por último hay conglomerados con clastos paleozoicos al este, que pasan a volcanodetríticos al oeste. Globalmente, los cuerpos sedimentarios se adelgazan hacia el oeste. Esta megasecuencia agrupa a las formaciones Caquiaviri, San Vicente Superior, Rosapata y Pomata. El espesor máximo es de 6.000 m en el centro del sinclinal Corque-Rosapata. La base de esta megasecuencia es posterior a  $16,6 \pm$  Ma, que es la edad más joven medida en la megasecuencia Oligoceno-Mioceno subyacente. Las gravas de las lavas dacíticas contenidas en la base de la megasecuencia proporcionaron una edad de  $14 \pm 0,4$  Ma.

#### • Megasecuencia Plio-Cuaternaria

Se encuentra generalmente discordante sobre la secuencia anterior, y está representada en la parte oriental por lutitas lacustres que contienen lentes de conglomerados de gravas del Paleozoico (Fm. Umala). En la parte superior de la serie, los depósitos lacustres son de grano más fino. En la parte occidental del Altiplano, la megasecuencia está compuesta enteramente de volcanodetríticos (Fm. Mauri 6) procedentes del oeste.

#### ROCAS MADRE

Los datos de riqueza actual de las diferentes rocas madre se presentan en la figura 3. Sólo se han representado los datos con un COT superior a 0.5% para facilitar la legibilidad. El nivel de maduración de cada una se discute en el texto. De forma resumida se puede afirmar que todas las rocas paleozoicas son maduras a sobremaduras. Dentro del Cretácico se encuentran

Fig. 6.- Mapa de los afloramientos de roca madre del Silúrico y Devónico, y extensión aproximada de los depósitos. Map showing the extension of the Devonian and Silurian facies, the grey part is where these series exist, on surface or subsurface, the white part indicate where they are missing, and the very light shaded one where there is no yet the data to conclude.

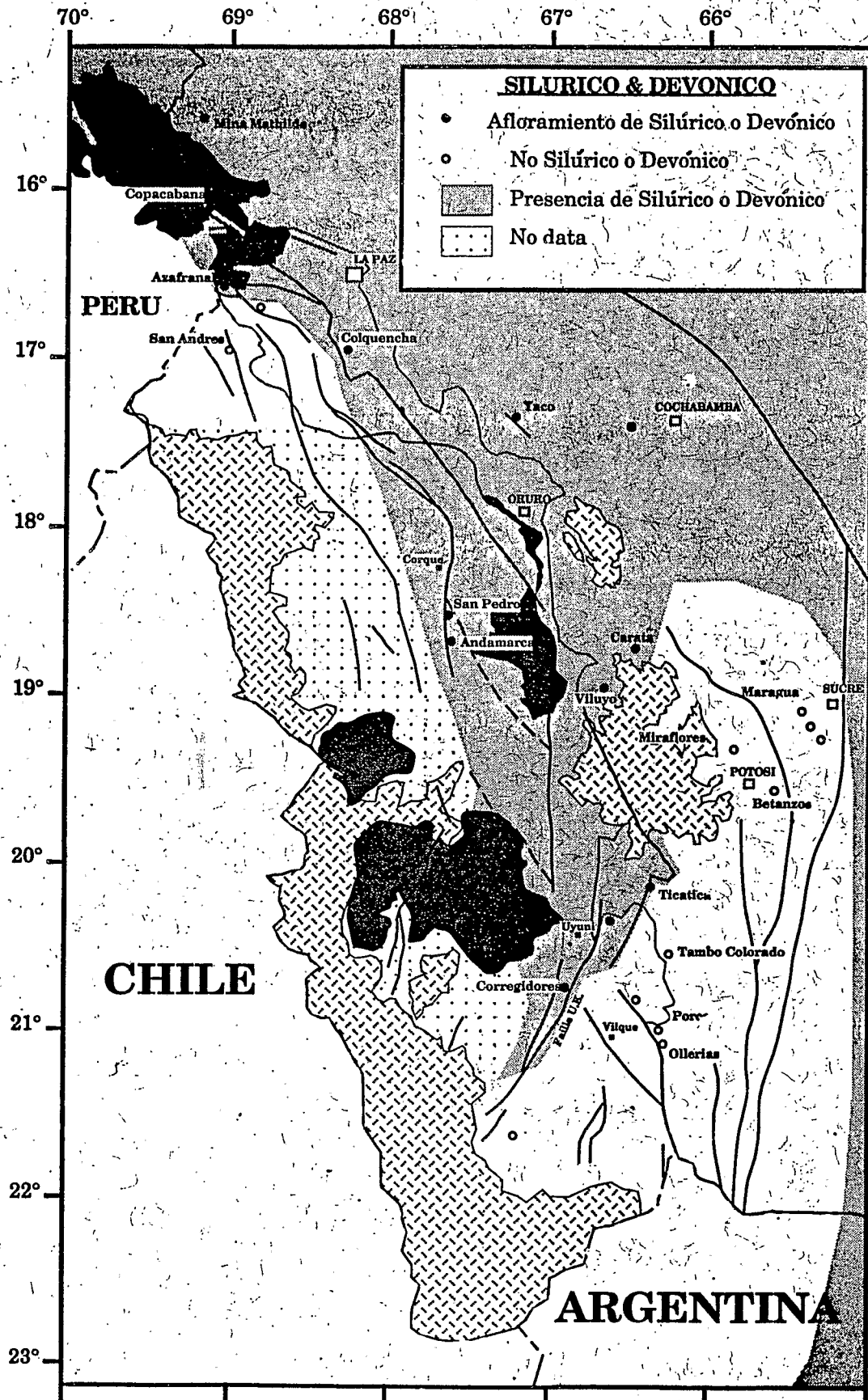


FIG. 6

todos los niveles de maduración, desde inmaduro hasta la ventana de petróleo. Las series terciarias y cuaternarias son continentales y no presentan hasta ahora ningún potencial como roca madre.

#### • Formación El Molino (Cretácico terminal)

La parte inferior de la Formación El Molino (Maastrichtiano) parece ser la roca madre principal del Altiplano (Aranibar *et al.*, 1995). La serie corresponde a una secuencia transgresiva-regresiva, y son los niveles dentro de las facies transgresivas los que presentan una mayor riqueza. El espesor total de la serie varía entre 100 y 500 metros, y el espesor de rocas madre alcanza hasta 60 metros. Los datos recolectados son muy variables. Por ejemplo, en el afloramiento de Andamarca, los análisis realizados en las muestras muestran un potencial remanente en COT de hasta 2,1% con un Tmax de 456°C. Por lo tanto, se puede estimar un S2 inicial de más de 20 mg HC/g, el cual permitiría considerar la formación como una excelente roca madre. Un número elevado de muestras presenta un potencial nulo, indicando que se trata de una roca madre poco potente. Actualmente, el máximo de S2 es de 50 mg HC/g (Tmax = 424°C), con un COT de 6,7% en Carata en la Cordillera Oriental. En general, los mejores valores proceden de la Cordillera Oriental, tal como muestra la figura 4. En este lugar, el Cretácico todavía es inmaduro, aunque esto no explica todo: su potencial disminuye claramente hacia el sur y aparentemente hacia el oeste.

Hay que considerar que el número de afloramientos es muy reducido hacia el sur. En el norte y centro se han tomado centenares de muestras, mientras que en el sur tan sólo, una docena. Por lo tanto, no se puede hacer una afirmación absoluta sobre la ausencia de potencial petrolífero para el Cretácico del sur, ya que en Argentina existen también facies de rocas madre de la misma edad (Formación Yacoraite) cerca de la frontera, y sobre todo más al sur, en Neuquén y Jagüel. Sin embargo, hasta el momento, no existe ninguna medida de COT > 0,5% en las muestras tomadas al sur. Algunos autores (Sempere, 1994) consideran que estas dos cuencas no estuvieron conectadas, y que el Cretácico de Bolivia constituye la terminación meridional de una gran cuenca de trasarco que se extendía todo a lo largo de la zona de subducción hasta Venezuela. La disparidad entre los datos de calidad como roca madre se debería a una compartimentación de este brazo sur de la cuenca, con presencia de zonas temporalmente aisladas de tipo lacustre en las que la materia orgánica habría quedado más o menos bien conservada. Otros, como Cherroni (1974), consideran que el Cretácico del sur del Altiplano es una de las ramas del rift del norte de Argentina (Salta).

#### • Formación Chaunaca (Cretácico superior)

La base de la Formación Chaunaca (Santoniano-Campaniano) es también una buena roca madre, aunque muy poco potente, en

torno a 10 m, de los que la mitad es roca madre. Entre los datos recolectados, el mejor COT es de 2,8% para una muestra madura (Tmax = 456°C), con un S2 remanente de 3,28 mg HC/g. El mejor potencial se encuentra en la Cordillera Oriental, en Betanzos, con S2 = 18 mg HC/g para una muestra en el comienzo de la ventana de petróleo (Tmax = 441°C, IH = 560). Debido a su espesor reducido, esta formación tiene una influencia muy limitada sobre el potencial petrolero de la región. Si el espesor de roca madre es 5 metros y el S1+S2 promedio original de 20 mg HC/g, el SPI correspondiente es de 0,25 t/m<sup>2</sup>, lo que es insignificante.

#### • Carbonífero-Pérmico

Igual que en el Subandino, en el Altiplano el Pérmico es conocido hacia el norte, pero desaparece hacia el sur (Fig. 5). La Formación Copacabana, del Carbonífero superior y Pérmico inferior, tiene un excelente potencial en la zona de Lliquimuni y un espesor de lutitas ricas en materia orgánica de más de 250 metros (ver Moretti *et al.*, esta revista). Esta unidad se encuentra con un espesor de lutitas muy reducido alrededor del Lago Titicaca, en muchos lugares no más que algunos metros. Es sólo al norte (Perú) y al este (Subandino) que se desarrollan estas facies con potencial. En Mina Matilde, una de las muestras, ya en la ventana de petróleo, tiene un potencial bastante alto con un COT remanente de 2,5 % y un S2 de 4 mg HC/g, pero corresponde a una capa de 10 cm. Un poco al sur, los COT de las muestras de Ancoraimés llegan hasta 1,1% (roca madura). La Fm. Copacabana fue muestreada también en Belén de Copacabana, donde se encuentra casi sin potencial, exceptuando una muestra de carbón (COT=23 %, S2=2 mg HC/g). La parte superior del Grupo Ambo (Fm. Siripaca y miembro superior de la Fm. Kasa) es de predominantemente deltaica y continental, e igualmente pobre en lutitas, y más bien podría constituir un buen reservorio en gran parte del Altiplano norte. La parte inferior del Grupo Ambo (Fm. Cumáná y miembro inferior de la Fm. Kasa) corresponde a diamictitas y lutitas, con algunas areniscas. Los mejores valores como roca madre se encuentran en esta parte, con un COT remanente de más de uno en Cañamarca y Copacabana.

Para concluir, debido a los espesores delgados de lutitas, ni las formaciones del Pérmico ni las del Carbonífero tienen una gran influencia sobre el potencial petrolífero del Altiplano.

#### • Devónico

El Devónico aflora al este de Corque, y es posible que esté presente en todo el Altiplano central hasta la falla Uyuni-Khenayani. No existe ninguna evidencia de su presencia al sur de esta falla. Al oeste de Corque no existe ningún afloramiento de Devónico, ni clastos que indiquen su presencia bajo los depósitos terciarios de la zona. Al norte, en Jesús de Machacá, el Cretácico apoya directamente sobre sedimentos del Paleozoico inferior, y en

Fig. 7.- Mapa de ubicación de indicios de superficie, "gas seep" y pozos en el Altiplano. Location maps of the oil seep, gas seep and wells on the Altiplano area.

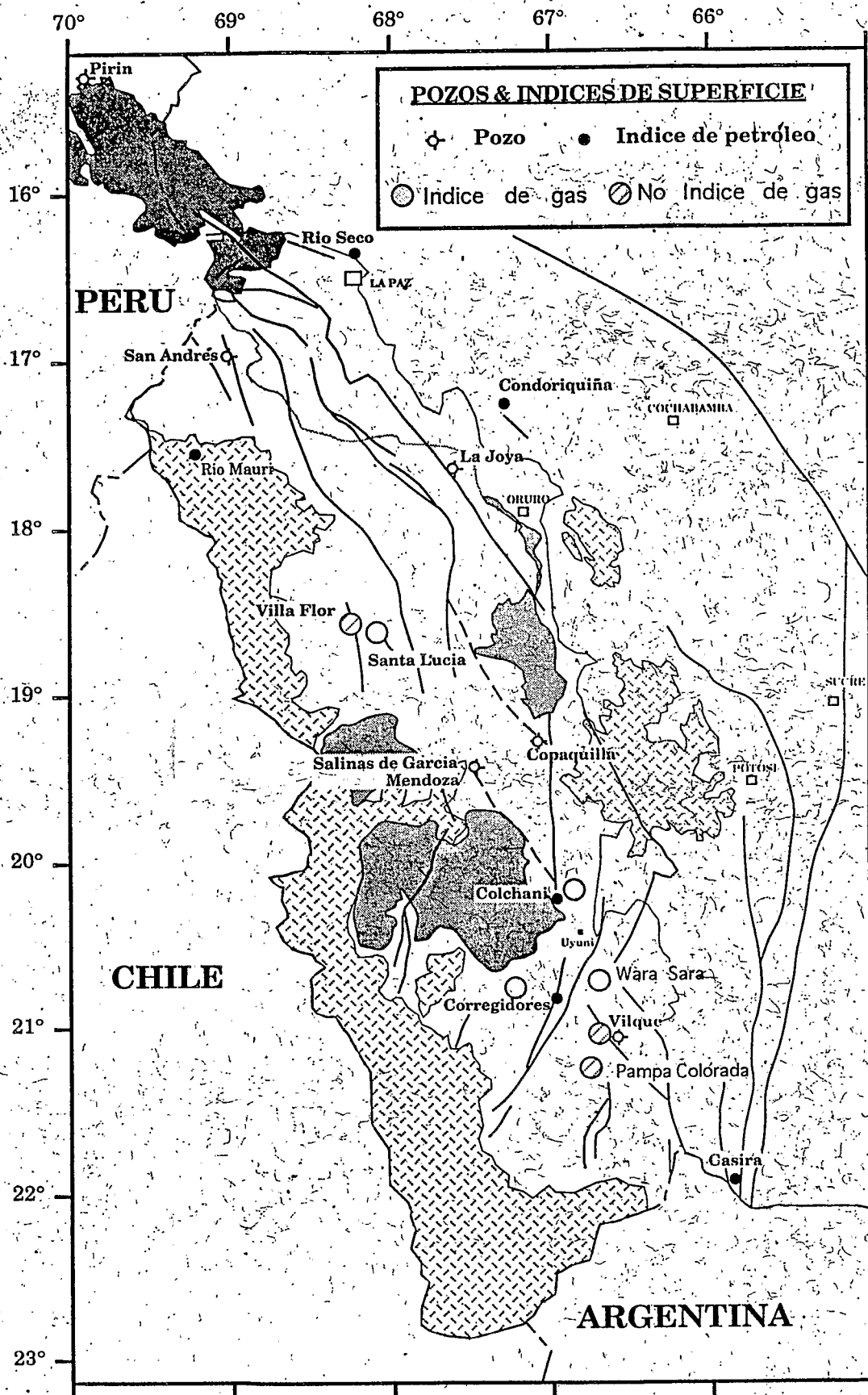
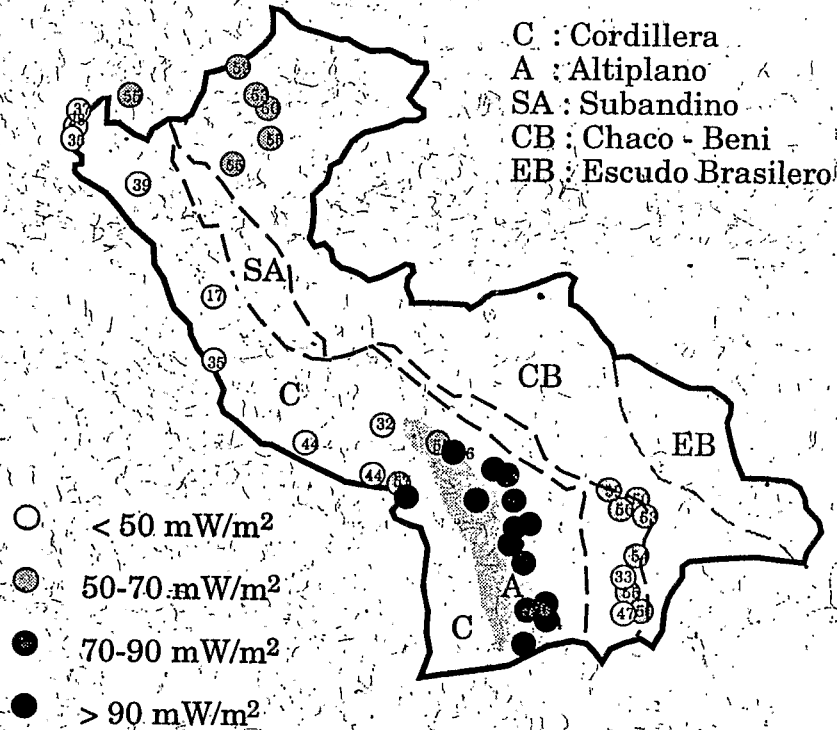


Fig. 7



### Flujo de calor - Peru & Bolivia

Fig. 8.- Mapa del flujo de calor en Bolivia y Peru (Henry & Pollack, 1981). *Heat flow maps for Bolivia and Peru (from Henry and Pollack, 1981)*

el pozo San Andrés sobre basamento precámbrico. Los datos de gravimetría y magnetometría de YPFB indican que el zócalo se encuentra próximo a la superficie. En la figura 6 se representa la extensión aproximada de los depósitos devónicos. En el norte de Chile, el Devónico se presenta con otras facies, metamórficas y/o de antearco, y puede que la parte oeste del Altiplano corresponda a la cordillera silúrica-devónica, donde por lo tanto no se habrían depositado estas formaciones. Sin embargo, más al sur, en Cerro Rincón (Argentina) existen facies conglomeráticas y arenosas del Devónico, pero que ya son parte de la cuenca de antepaís.

El potencial del Devónico es similar al del Subandino (COT inicial del orden de 1,5%), aunque su espesor es menor (más de 3.000 m en Sica Sica, pero disminuye en otras partes por la erosión a partir del Carbonífero medio). A diferencia del Cretácico, los resultados de los análisis son bastante homogéneos. Según la base de datos de YPFB, en las secciones realizadas, el conjunto de las lutitas de la Formación Colpacucho presenta un potencial no nulo (COT > 0,5%). El máximo COT medido es de 2,34%. Las muestras de Colquencha del Devónico inferior (Fig. 6) presentan un potencial medio: COT de 1,55% y 1,28%,

S2 de 2,69 mg HC/g y 1,12 mg HC/g, IH de 173 y 87 para dos muestras que se encuentran ya en la ventana del petróleo ( $T_{max} = 444$  y  $442^{\circ}C$ ), lo que corresponde a un COT inicial alrededor de 1,8% y un S2 inicial entre 6 y 9 mg HC/g.

#### • Silúrico

El Silúrico aflora en la Cordillera Oriental y junto a la falla Uyuni-Khenayani. Igual que el Devónico, se puede esperar que esté presente en subsuelo bajo el Terciario, aunque no hay pruebas de su existencia al oeste de Corque, y falta al norte (Jesús de Machaca y pozo San Andrés). En el borde de la Cordillera Oriental fue muestreado en Sorata, donde el espesor de lutitas es importante (más de 500 metros), toda la serie está sobremadura y el potencial remanente es bastante homogéneo (COT entre 0,5 y 0,6%). De igual forma que en el Subandino, se supone que el Silúrico tiene un potencial bastante similar al del Devónico (COT original de 1,5% y S2 de 10 mgHC/g). Su presencia está probada al este, y es hipotética al oeste del Altiplano. Como con el Devónico, es probable que no exista al oeste de la falla de Corque. En general, su espesor no es conocido en subsuelo en el Altiplano.



### • Paleozoico inferior

El Ordovícico aflora en toda la Cordillera Oriental, pero la gran parte de las muestras vienen de los bordes del lago Titicaca. En Sorata y Ancoraimas, el Ordovícico está, como el Silúrico, sobremaduro, pero tiene un COT remanente de más de 1%. Una muestra del Paleozoico inferior al sur del lago Titicaca (Jesús de Machaca) presenta también un potencial remanente (COT de 0,64%, y S2 de 1 mg HC/g) para una muestra madura (Tmax = 455°C). Más al sur, se evidencian en Tica Tica valores de COT remanente de hasta 2%. El espesor no es conocido (un mínimo de 300 m aflora en Jesús de Machaca) y el nivel de maduración del Paleozoico inferior antes del desarrollo del Altiplano no es conocido. Al este del Altiplano, como la cuenca silúrico-devónica está bien desarrollada con más de 3.000 metros de espesor, se espera un Paleozoico inferior ya sobremaduro durante el Carbonífero. Al oeste del Altiplano no se conoce el Paleozoico. Si el límite del antepaís siluro-devónico estaba cerca del centro actual del Altiplano, puede que el Paleozoico inferior en la parte oeste nunca haya sido profundamente soterrado antes del Terciario. Con esta hipótesis optimista, el Ordovícico podría estar involucrado en el sistema petrolero actual.

### Parte Oeste del Altiplano

Como ya se mencionó, el subsuelo de la parte oeste es poco conocido por falta de afloramientos y pozos. Una hipótesis ya presentada es que el límite de la cuenca paleozoica estaba en el centro actual del Altiplano, y por lo tanto no se esperarían encontrar Silúrico o Devónico al oeste de la Falla de Corque-Rosapata, y el Ordovícico podría estar presente. En el norte de Chile existen potentes depósitos del Paleozoico superior, aunque en su mayoría se trata de materiales volcánicos y volcanoclásticos continentales de intrarco (Bahlburg & Breitkreuz, 1991), sin potencial petrolífero. Al sur del Altiplano, en las líneas sísmicas, se ven reflectores profundos bajo el Cenozoico. Una hipótesis es que se trata de una serie jurásica, tal vez conectada con el sistema de cuenca de trasarco de Chile. Esta cuenca es bastante bien conocida (Prinz *et al.*, 1994) y los dos bordes afloran en Chile hasta 21°S. Más al norte, de 21 a 19°S, no se conoce el borde oriental de la cuenca jurásica. A la latitud de Iquique, en Chile, los depósitos de la cuenca de trasarco mesozoica tienen un espesor de más de 5.000 m, comenzando con depósitos continentales de apertura de la cuenca en el Triásico superior, seguidos por la Fm. Copaquire, marina, del Jurásico inferior. Por encima, la Fm. Aquiuño, del Jurásico medio, presenta una intercalación de lutitas negras con calizas, y una parte superior potente (unos 700 m) de lutitas con areniscas. El Oxfordiano (Fm. Majala) se compone de lutitas, limolitas y areniscas, también de origen marino. Por encima, la Fm. Guatacondo es de ambiente continental y está compuesta de lutitas rojas que alcanzan los 3.000 m (Smoje, 1989). Todas las lutitas y tal vez parte de las calizas de las unidades marinas tienen potencial petrolífero (Muñoz & Charrier, 1993). Más al norte, en la Quebrada Coscaya (20°S), los depósitos del Jurásico son más continentales, pero el Jurásico inferior (Toarciano) es marino, constituyendo una plataforma carbonatada

en la que las calizas también tienen potencial petrolífero (Muñoz, 1989). Parte de la cuenca podría estar presente en subsuelo a la latitud de los salares de Uyuni y Coipasa. La geometría conocida de 21 a 23°S excluye la posibilidad de una extensión de esta cuenca dentro de Bolivia, al sur del Salar de Uyuni, y por lo tanto los reflectores profundos desconocidos al nivel de Inés deben tener otra edad.

### MANIFESTACIONES DE HC EN SUPERFICIE Y POZOS

#### Oil seeps:

En la figura 7 se presenta la localización de los indicios de superficie que se conocen en el Altiplano. Al contrario que en el Subandino, donde más de 200 fueron ubicados, los indicios de superficie en el Altiplano son poco numerosos, y no se conoce el origen de la mayoría de ellos.

Río Seco: petróleo de color rojizo en gravas del Cuaternario a lo largo de la falla de Peña. El origen es desconocido.

Río Mauri (Quebrada Churumani): este "oil seep" es el único al oeste de Corque, en una zona donde las rocas madre son desconocidas, y por lo tanto tiene una importancia estratégica, aunque lamentablemente su origen no es seguro. El petróleo sale del Terciario con 24° API, y fue considerado como Pérmico, aunque estudios más recientes basados sobre los biomarcadores lo interpretan como del Paleozoico inferior, probablemente Ordovícico. Es de notar que el estudio que concluía que se trata de un petróleo de origen pérmico no consideraba la posibilidad de un petróleo ordovícico, y descartaba la posibilidad de que se tratara de origen Cretácico o Devónico.

Condoriquiña: el petróleo sale del Devónico con 34° API, pero con un origen incierto entre Devónico y Cretácico.

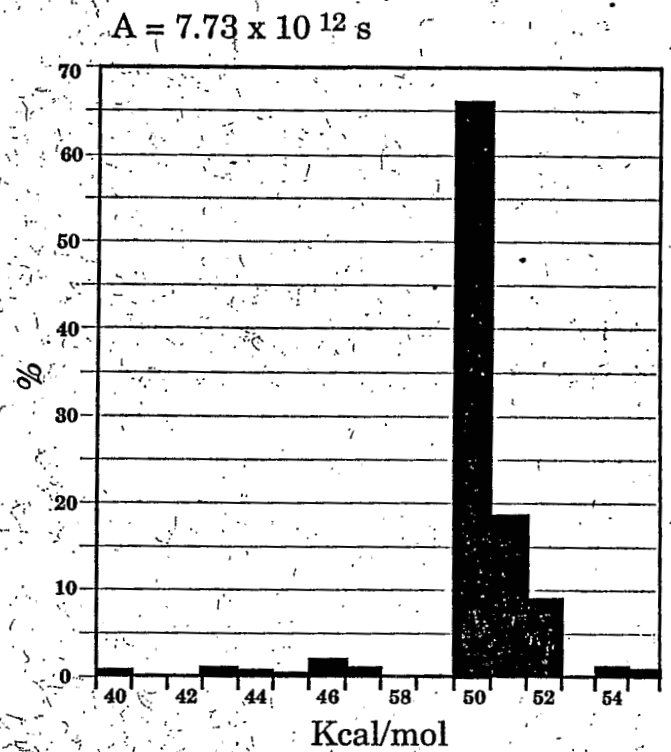
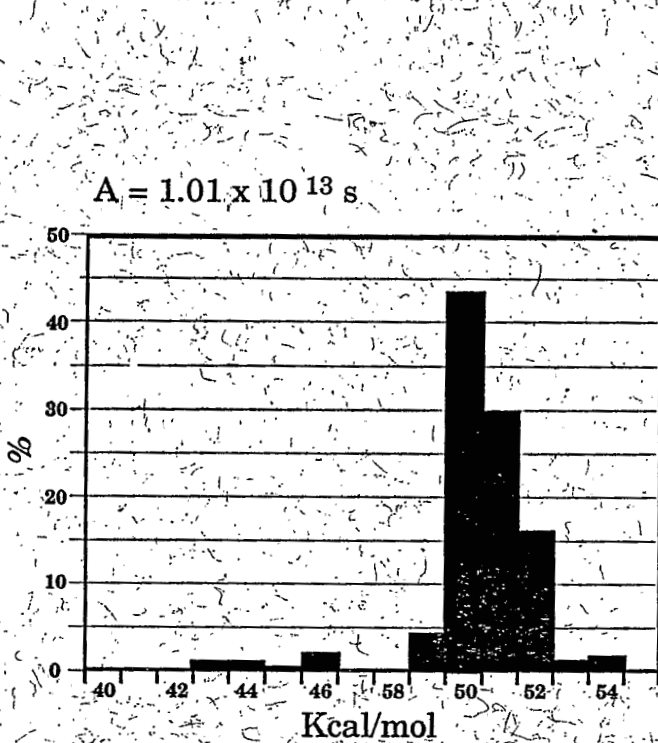
Colchani: el petróleo aquí tiene también un origen incierto entre Devónico y Cretácico. El grado de maduración es elevado (PR de 1). Es de notar que los afloramientos de Cretácico más próximos (Chita-Esté al norte) muestran un Cretácico al comienzo de la ventana del petróleo (PR de 0.7) no compatible con el nivel de maduración de este petróleo.

Corregidores: se trata de un afloramiento a lo largo de la falla Uyuni-Khenayani. La presencia de hidrocarburos (petróleo y gas) en los bordes del salar fue identificada por geólogos de YPF, aunque no se hicieron mayores estudios, y el afloramiento ahora es difícil de reubicar.

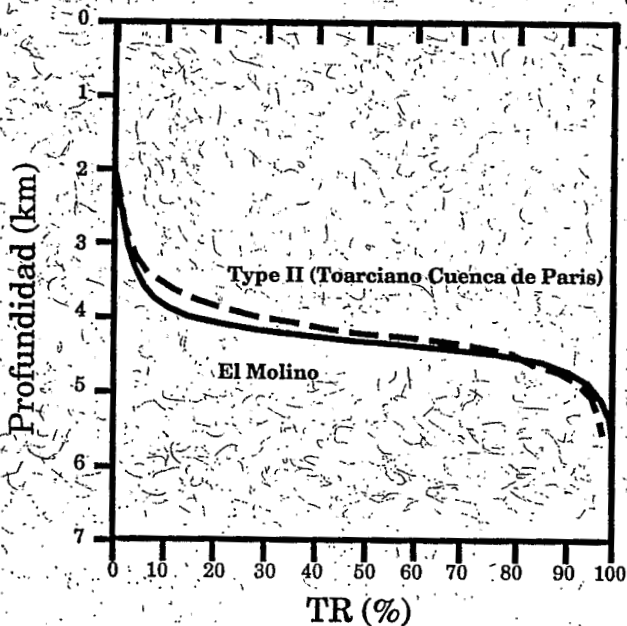
Cerrillo: este "oil seep" se menciona a veces, y según geólogos de YPF, se trata de un error que perdura. En el afloramiento se ven manifestaciones de óxidos de manganeso.

Casira: situado en la Cordillera Oriental, este "oil seep" es de origen Cretácico y presenta características similares a las del petróleo de la región de Salta (Argentina).

## Parámetros cinéticos



## Comparación entre El Molino y el Type II classico



**Fig. 9.-** Parámetros cinéticos de la parte inferior de la Formación El Molino, y comparación con la evolución de una roca madre tipo II clásico (Toarciano de la cuenca de Paris). Las dos muestras vienen de Carata en la Cordillera Oriental, donde el Cretácico es inmaduro, y tienen un COT de 3.2 y 3.7%. Las dos indican la misma evolución con la profundidad, la cual es muy parecida a la evolución de un tipo II clásico.

*Fig 9: Kinetic parameters from the Molino source rock and comparison with the evolution versus depth of the default value of type II source rock (Toarcian of the Paris basin). The two samples are coming from the Carata outcrops located on the Cordillera near Sucre, they are immature with a COT of 3.2 and 3.7%. The two display a very similar evolution versus depth, which is also very similar from the one of the Type II.*

Existen varios estudios recientes de *gas seep* (método GeoMicrobial Technology, con muestreos a un metro y medio de profundidad) en las estructuras de Colchani, Río Grande, Wara Sara y Santa Lucía. El mismo tipo de estudio en Vilque y Villa Flor resultaron en conclusiones negativas sobre la presencia de gas de hidrocarburo.

#### Pozos

Hasta el momento se han perforado cinco pozos en el Altiplano (Fig. 7).

**San Andrés:** perforado por Superior Oil Co. en 1976 en una estructura visible en gravimetría y en las líneas sísmicas. Este pozo perforó muy pronto el basamento precámbrico (a 2769 m), después de haber atravesado 2440 m de Terciario (Fm. Potoco) y 300 m de Cretácico. No hay datos de indicios ni en el Terciario ni en el Cretácico.

**La Joya-1:** perforado por Sun en 1975 en una estructura oligomiocena de la cuenca de Poopó. El pozo atraviesa el Terciario con poca calidad como reservorio, y acaba en Silúrico a 2900 m.

**Salinas de García Mendoza:** perforado por YPF en 1975 en una estructura anticlinal. No se detectaron ni reservorios ni indicios de petróleo. Se atravesó el basalto de Tambillo a 2015 m, y se abandonó el pozo a 2641 m en el Mioceno.

**Copaquilla:** es un pozo profundo (4055 m) perforado por YPF en 1974 enteramente a través del Cretácico (Albiano-Cenomaniano), que encontró principalmente anhidritas sin penetrar el objetivo, que era el Devónico.

**Vilque:** también fue perforado por YPF en 1972, sobre un anticlinal de superficie. Se encontró un reservorio potencial en el Cretácico superior a 3100 m. El Cretácico es muy delgado (<110 m) y la Formación El Molino sólo tiene una docena de metros, sin potencial petrolífero. El pozo se terminó a 3559 m, después de atravesar 350 m de Paleozoico inferior (Silúrico) subyaciendo directamente al Cretácico. Se midieron numerosos indicios de nitrógeno y de metano en la perforación. La presencia de metano podría indicar la existencia una roca madre sobremadura próxima, pero no se ha podido hasta ahora explicar la presencia del nitrógeno en los pozos del Altiplano. Actualmente, también el pozo de Colchani, que está en perforación por YPF, muestra presencia de N<sub>2</sub>.

Se puede mencionar también que un pozo fue perforado en Chile en el salar de San Pedro de Atacama. Este pozo alcanzó el Paleozoico superior a unos 4800 m de profundidad, directamente debajo de unidades del Cretácico superior y de la Formación Purilactis, sin que se haya encontrado ninguna roca madre en el Cretácico ni en el Paleozoico. Por lo tanto, el Jurásico que se esperaba encontrar como roca madre está ausente, y el borde oriental (erosivo) de la cuenca jurásica se encontraría más al oeste.

Al norte del Lago Titicaca, en Perú, el campo de Pirín está produciendo desde los años 50, y la Fm. Copacabana es tanto la roca madre como el reservorio.

#### MODELAJE

##### • Hipótesis y madurez pre-oligocena

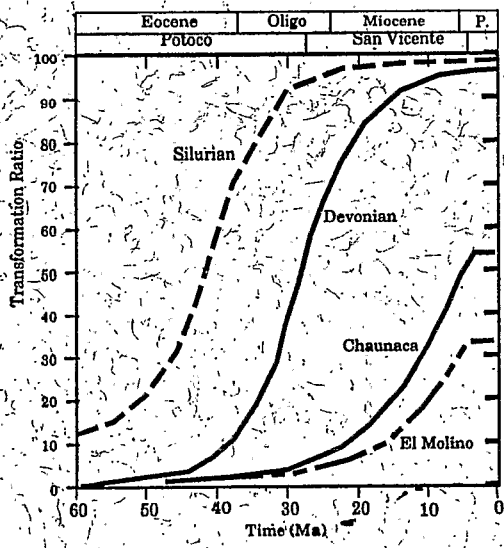
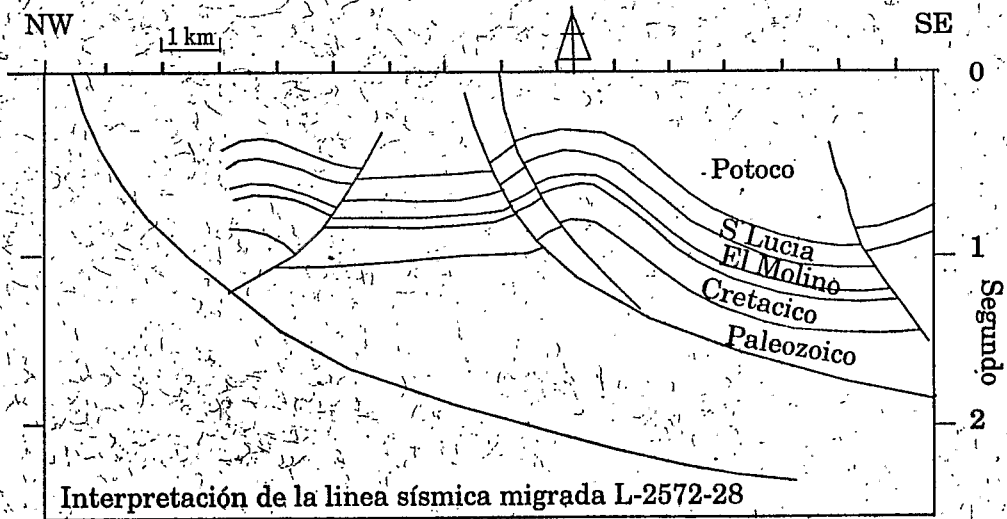
La evolución geológica de la región hasta el Cretácico es poco conocida debido al escaso registro preservado. En la zona del Lago Titicaca existe evidencia de erosión entre el Carbonífero superior y unidades subyacentes, con desaparición local del Carbonífero inferior y Devónico superior (Díaz, 1991, 1994). En la Cordillera Oriental, esta erosión alcanzó hasta unidades del Silúrico. Igualmente, la evolución del Jurásico y Cretácico está también en discusión (Sempere, 1994, 1995), sobre todo en cuanto a la existencia o no de un mar abierto y de depósitos jurásicos; existencia de un *rift* cretácico, y variaciones del flujo de calor durante este periodo.

La maduración de la Formación El Molino es, en todas las hipótesis, posterior al eventual aumento del flujo de calor del *rift* mesozoico, y su soterramiento no es importante sino hasta después del Oligoceno. Respecto al Devónico, se ha utilizado la hipótesis de que no estaba maduro hasta el Terciario, y por lo tanto la historia anterior al Terciario importa poco. Esta hipótesis se ha verificado en Jesús de Machaca, que es el único lugar donde se tienen datos de madurez para el Cretácico y para el Paleozoico inferior, ambos con el mismo nivel de maduración. Considerando que ambos están en la ventana del petróleo, no se debe excluir la posibilidad de que el Paleozoico inferior haya sufrido una maduración parcial durante la deposición del Silúrico y Devónico, inferior o igual a la originada durante el Terciario.

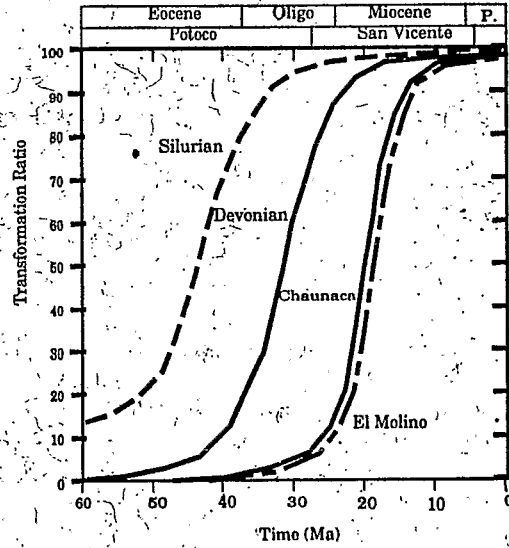
##### • Termicidad

La figura 8 sintetiza los datos de flujo de calor en Bolivia y Perú. El Altiplano es una zona anormalmente caliente con un flujo medio entre 80 y 100 mW/m<sup>2</sup>. También es una zona de corteza muy potente. Como ya fue mencionado, los datos de sismología indican que la superficie de Mohorovicic está a una profundidad de 70 km bajo el Altiplano (James, 1971; Wigger *et al.*, 1994), y por tanto que hay una duplicación de la corteza continental. El mismo fenómeno se observa en el Himalaya, donde la corteza llega a tener un espesor de 90 km y el flujo de calor localmente alcanza los 300 mW/m<sup>2</sup>. Este flujo de calor elevado en zonas con fuertes tasas de erosión puede deberse a un régimen transitorio, durante el cual el gradiente medido parece más elevado de lo que debería ser. En el caso de Bolivia, al igual que en el Himalaya, una de las causas de esta termicidad es la radioactividad, la cual es claramente más importante cuando hay una corteza doble. En Perú, donde existe una corteza no muy potente y no hay una estructura como el Altiplano, el flujo es normal, independientemente de la existencia de una actividad volcánica importante. No obstante, algunos autores atribuyen este aumento del flujo de calor a la gran cantidad de fluidos calientes que percolan la corteza (Geise, 1994). Por otro lado, los estudios

Estructura de Colchani



CASO - 1:  
Potoco - 2500 m, San Vicente 300m, erosión Plioceno 2300m  
Misma historia que Chita



CASO - 2:  
Potoco - 2500 m, San Vicente 2000m, erosión Plioceno 4000 m

Fig. 10.- Modelaje GENEX sobre la estructura de Colchani: caso 1: Evolución del TR para cada una de las rocas madres, caso 2: Evolución del TR para cada una de las rocas madres. Fig 10: Modeling made with the Genex software on the kitchen of the Colchani play. Two cases has been modeled due to the dubness on the original San Vicente Fm thickness. - case 1: The San Vicente Fm. was thin as northward in Chita, - case 2: The San Vicente Fm. was thick as southward.

de anomalías gravimétricas (-400 mgal en el Altiplano; Introcaso, 1993), de sismología (Wigger *et al.*, 1994) y de actividad magmática, concluyen todos en una litosfera muy adelgazada debajo del Altiplano especialmente en el sector occidental. Este fenómeno induce también un aumento del flujo de calor, que puede ser la causa mayor de la elevación del Altiplano tanto en Chile como en Bolivia. El flujo de calor en la base de los sedimentos es en general elevado, pero existen grandes variaciones en superficie debido a la sedimentación y erosión pliocuaternarias. Las zonas que se están elevando actualmente parecen mucho más calientes (en particular la Cordillera Oriental), mientras que las cuencas profundas, llenas de sedimentos recientes, parecen más frías.

Para concluir, atribuimos la elevada termicidad, entre 80 y 100 mW/m<sup>2</sup>, a una radioactividad elevada originada por el apilamiento de la corteza continental y por el adelgazamiento de la litosfera. Para la modelización geoquímica, hemos considerado que el flujo aumentó cuando se formaron los Andes (27 Ma). Como la temperatura de superficie es baja, hemos utilizado un valor promedio de cero. La ventana de petróleo estaría alrededor de 2800 metros, independientemente de todas las complicaciones debidas a la sedimentación y/o erosión.

• **Espesores de roca madre**

Como conclusión del estudio de los datos de geoquímica, y siempre refiriéndonos a las zonas donde existen datos, el potencial petrolífero (espesor y COT) que se puede asumir es:

COT	Espesor			
	norte	centro	sur	
Fm. El Molino:	4 %	20 m	50 m	10 m
Fm. Chaunaca:	4 %	0	5 m	0
Permo-Carbonífero:	2 %	50 m	0	0
Devónico:	1.5 %	400 m ?	400 m ?	200 m ?
Paleozoico Inferior:	1.5 %	200 m ?	200 m ?	200 m ?

Puede que existan también diferencias entre el este y el oeste de cada zona. Como ya se menciona en los mapas, la presencia de Paleozoico al oeste es muy especulativa.

• **Parámetros cinéticos**

La Formación El Molino está inmadura en Yaco y Carata, en la Cordillera Oriental. Por lo tanto fue muestreada y se calcularon los parámetros cinéticos para usar en el modelaje. La figura 8 presenta los datos medidos para dos muestras de Carata (ubicación en la Fig. 4). Las dos son inmaduras (Tmax = 427 y 423°C) y bastante ricas (COT = 3.74 y 3.54%, HI = 654 y 527). Las dos indican una repartición de la energía de activación similar a un tipo II por la evolución con la profundidad de la tasa de transformación. La evolución del Tmax es un poco diferente, entre 400 y 430°C. Las dos muestran evolución idéntica, aunque

no se ve sobre la distribución debido a la diferencia de parámetro pre-exponencial. Sobre la figura se representa una comparación de la evolución en función de la profundidad entre la Fm. El Molino (segunda muestra) y el tipo II clásico (que por defecto es el Toarciano de la cuenca de Paris). Para el Devónico y Silúrico se utilizó el tipo II clásico para la modelización.

• **Evolución tectonosedimentaria**

Siguiendo los trabajos recientes de Ph. Rochat (doctorado Univ. Grenoble) y P. Baby, el Altiplano se divide en dos dominios estructurales:

**Dominio oriental:** Caracterizado por un sistema de cabalgamientos con vergencia oeste y cabalgado por la Cordillera Oriental.

**Dominio occidental:** Caracterizado por la presencia de hemigrábenes terciarios que posteriormente fueron invertidos.

En general, se pueden distinguir 4 grandes periodos de deformación asociados a cuatro megasecuencias sedimentarias terciarias:

**Periodo Eoceno a Oligoceno inferior:** Se caracteriza por la apertura de hemigrábenes a lo largo de fallas transcurrentes senestrales con dirección N-S. Los depósitos asociados son continentales, correspondiendo en parte a facies de llanura de inundación y evaporitas.

**Periodo Oligoceno superior-Mioceno inferior:** Caracterizado por la aparición de gran cantidad de conglomerados de clastos paleozoicos procedentes del este, donde comienza a formarse la Cordillera Oriental. Esta cabalga hacia el oeste sobre el Altiplano, y contribuye así a su aislamiento.

**Periodo Mioceno medio a superior:** Aparecen las primeras inversiones de hemigrábenes eocenos. La Cordillera Oriental, que cabalga hacia el este sobre la placa brasileña, continúa su levantamiento y sigue actuando como fuente de alimentación de sedimentos para el Altiplano. Al oeste del Altiplano, los sedimentos proceden de la Cordillera Occidental y son de carácter volcanodetrítico.

Las inversiones de hemigrábenes prosiguen, así como el levantamiento de la Cordillera Oriental. En su totalidad, el Altiplano asciende altitudinalmente debido a la anomalía térmica caliente en la litosfera subyacente y al gran espesor de corteza (70 km). La fuente de sedimentos continúa siendo la Cordillera Oriental, al este, y la Cordillera Occidental, al oeste.

• **Timing**

Las estructuras que pueden estar llenas claramente deben ser anteriores a la maduración y a la migración de los HC. Los

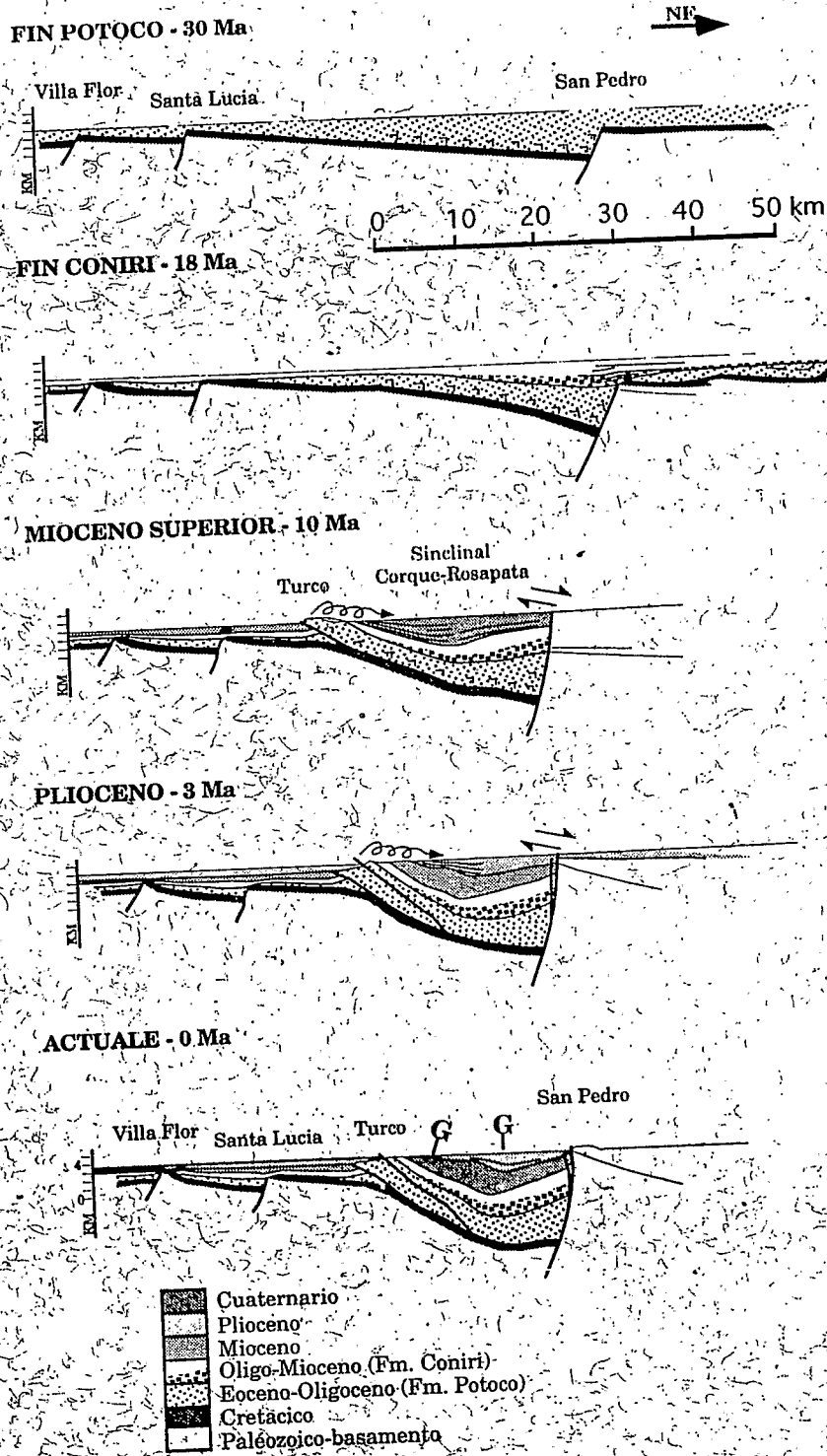


Fig. 11.- Evolución terciaria de la parte oeste del Altiplano centro: sinclinal de Corque-Rosapata, Santa Lucia, Villa Flor (de Rochat et al., 1995 y Moretti et al., 1995). Fig. 11- Tertiary evolution of the central-western part of Altiplano, Corque Rosapata, Santa Lucia and Villa Flor synclines (from a Rochat's and Baby's study presented on Rochat et al., 1995 and Moretti et al., 1995).



revelorios son las areniscas de la Fm. El Molino y sus calizas por porosidad secundaria y, cuando existen por encima, las areniscas de las formaciones Potocó y Cayara. Por lo tanto, si se trata de trampas estructurales, son las estructuras del Neógeno las que deben ser estudiadas.

Si siguiendo el esquema geológico presentado, la historia paleógena de la zona empieza con un fase de sedimentación durante la cual las únicas estructuras son la parte alta de los hemigrábenes. Muchas de las estructuras son más bien debidas a las fases de compresión posteriores. En el Mioceno, el soterramiento del Cretácico sobrepasa los 3.000 m en muchos lugares, constituyendo la fase principal de maduración y migración de los HC. Gran parte de las estructuras de superficie son debidas a la fase actual de compresión, y por lo tanto son posteriores a la maduración y migración del petróleo.

### EJEMPLOS DE ALGUNAS ESTRUCTURAS

#### • Estructura tipo Colchani

##### Rocas Madre

El Cretácico aflora unos pocos kilómetros al norte de Colchani, en los alrededores de Chita, y fue muestreado. En un primer estudio, de un total de siete muestras, sólo una tiene un potencial interesante que indica una madurez bastante baja ( $T_{max}=426^{\circ}C$ , inmadura hasta el inicio de la ventana de petróleo). Los datos de TAI muestran una madurez más alta ( $TAI=2+$ ). En otro trabajo posterior, se estudiaron 35 muestras, y tres de ellas tienen un potencial bueno para la Fm. El Molino y muestran una madurez algo avanzada, con un  $T_{max}$  alrededor de  $438^{\circ}C$  (ventana de petróleo). Existen también datos de vitrinita que indican una reflectancia alrededor de 0.66 (inicio de la ventana de petróleo). El potencial del Paleozoico no se conoce en la zona pero aflora cerca, en Andamarca e Islas Grandes. Parece que los datos más fiables son los segundos, y se considera que la Fm. El Molino está en el comienzo de la maduración en Chita. Los datos no muestran un espesor muy grande de la roca madre: 30 metros de Fm. El Molino y 10 metros de Fm. Chaunaca fueron utilizados en el modelaje. Para el Paleozoico, 250 metros de roca madre devónica fueron estimados, y 200 metros para el Silúrico. Las estimaciones sobre la calidad y la cantidad de rocas madre no tienen influencia sobre la historia de la madurez que se calcula.

##### Evolución

La estructura de Colchani es un pliegue que afecta claramente a todo el Cretácico y a la Fm. Potocó, (Fig. 10). El nivel de despegue está dentro del Paleozoico. Actualmente, la estructura está poco profunda y la Formación El Molino llega a una profundidad de menos de 2.000 metros, que no es suficiente para la maduración. La Fm. Potocó aflora en la zona, pero no se conoce el espesor real de la Fm. San Vicente, que fue depositada inicialmente y luego erodada.

En la zona, la Formación Potocó tiene un espesor más o menos constante de 2.500 metros. Este espesor es casi suficiente en Chita para explicar el nivel de madurez del Cretácico, faltando solo 300 metros de la Formación San Vicente. La estructura de Colchani está ubicada al sur de la de Chita, y ambas están separadas por una falla. El problema es saber si esta falla es reciente o no, y si jugó un papel importante durante la deposición de la Formación San Vicente.

Dos hipótesis pueden suponerse:

Caso-1: La historia de la sedimentación es la misma en Chita y en Colchani.

Caso-2: El espesor de la Fm. San Vicente fue mucho más grande en Colchani que en Chita y llegaría hasta 2.000 metros, como en Tambo Colorado, ubicado al este de Colchani.

El modelaje resultante de estos dos casos se ve en la figura 10.

Caso 1: La maduración de las rocas madre es activa durante el Mioceno (deposición de la Fm. San Vicente). El Cretácico superior alcanza una tasa de transformación (*Transformation Ratio*) de hasta 30-50 % en la ventana de petróleo, el mismo valor que en Chita Este. Si este caso es correcto, el *oil seep* de Colchani podría tener solamente un origen paleozoico porque la madurez del Cretácico no es suficiente. En la figura se ve la cantidad de petróleo que fue expulsada durante cada fase. Hay que notar que la cantidad es por cada gramo de roca y al final sale casi cuatro veces más de petróleo de los 250 metros de Devónico ( $TOC=1.5\%$ ) que de los 30 metros de El Molino ( $TOC=4\%$ ).

Caso 2: La maduración del Paleozoico y del Cretácico se inicia durante la deposición de la Fm. Potocó. El Silúrico y el Devónico están sobremaduros al inicio del Mioceno. El Cretácico entra en la madurez durante la deposición de la Fm. San Vicente, y está sobremaduro ( $TR=100\%$ ) al final del Mioceno (10 Ma). Si este caso es correcto, el *oil seep* de Colchani podría tener tanto un origen Paleozoico como Cretácico.

Además de este problema, no se conoce la edad de la estructura. Parece que la Fm. Potocó no muestra ninguna variación de espesor en la zona, y por lo tanto la estructura sería más joven. Si la estructura se desarrolla durante la sedimentación de la Fm. San Vicente o al final de la Fm. Potocó, el contacto entre la Fm. Potocó y la Fm. San Vicente es algunas veces erosivo, podría haberse formado durante la sedimentación de la Fm. San Vicente. Si la estructura fuese más joven y contemporánea a la erosión, no habría generación de petróleo durante esta fase, con los consiguientes riesgos que lleva esta situación.

##### Conclusiones:

La presencia de hidrocarburos en la zona está probada (*oil + gas seep*) y las posibles rocas madres están aflorando en los alrededores. Realizado el modelaje geoquímico, se concluye que:

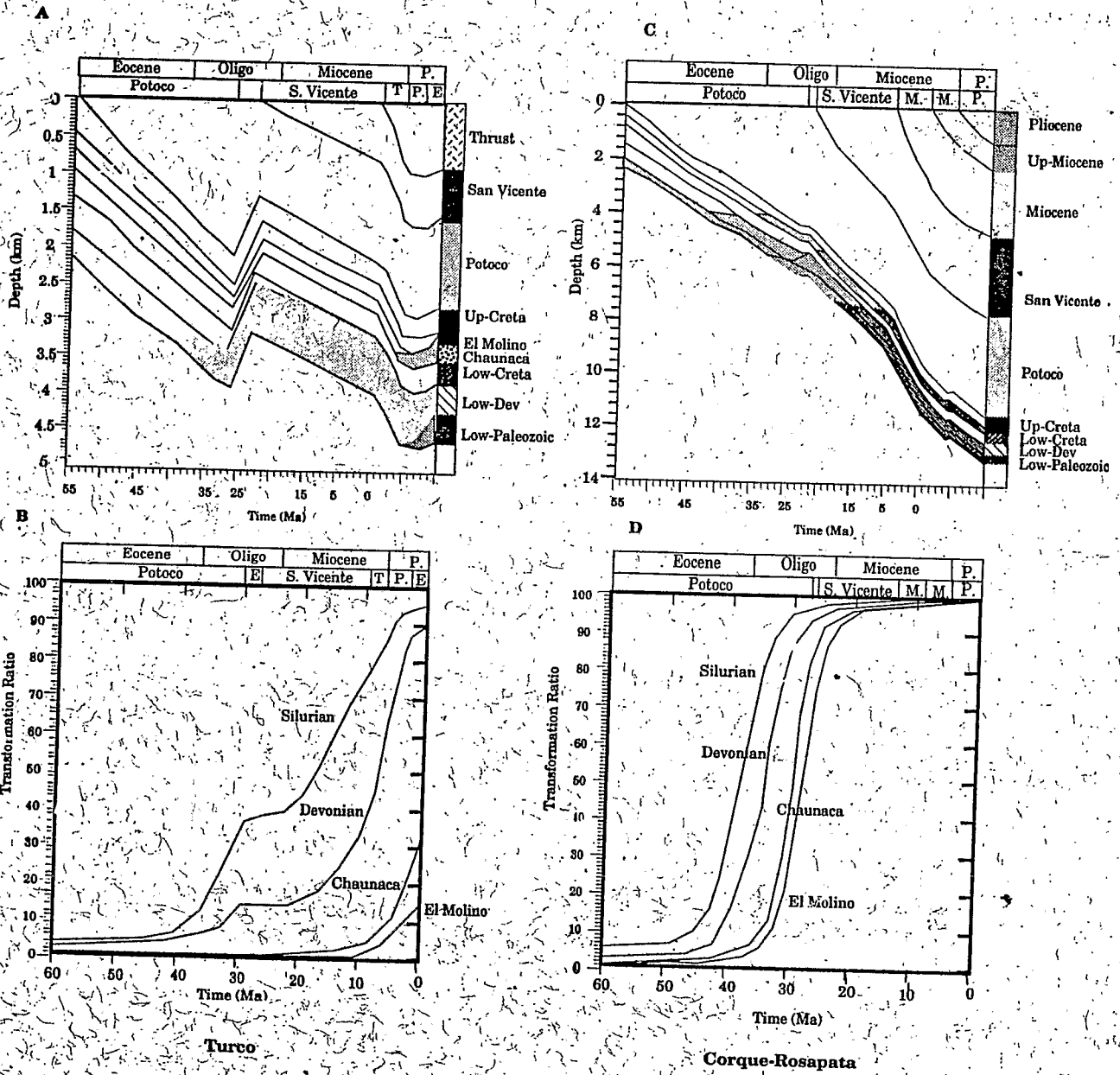


Fig. 12.- Modelaje GENEX sobre el sinclinal de Corque Rosapata al fondo del sinclinal y al nivel de la falla de Turco (ubicación en Fig. 11). a y c- Ventana del petróleo. b y d- Evolución del TR para cada una de las rocas madres.

Fig. 12: Modeling on the Corque-Rosapata syncline  
a - b on the deepest part of the syncline (see location Fig 11)  
c - d at the level of the Turco thrust.

In each case, the evolution versus depth has been displayed (a and c) as well as the evolution versus time of each source rock (b and d).

a - Si la estructura es pre o sin-Mioceno, pudo llenarse durante la deposición de la Fm. San Vicente. La roca madre puede ser del Paleozoico o del Cretácico. La influencia del Cretácico sería más alta si la Fm. San Vicente, hoy erodada, hubiera tenido un mayor espesor.

b - Si la estructura es pliocena y contemporánea con la erosión final, los riesgos de una estructura vacía son altos.

La perforación en curso del pozo Colchani-X1 por YPFB debería permitir responder a algunas de las preguntas actuales.

• Estructura tipo Santa Lucía

Rocas madre:

La estructura de Santa Lucía está situada al oeste de los afloramientos de Andamarca y San Pedro. En Andamarca, la Fm. El Molino está sobremadura, pero su potencial inicial fue alto. La roca tenía un S2 alrededor de 28 mg HC/g, lo que corresponde a un TOC de 4%. En San Pedro de Huaylloco, la Fm. El Molino está en la ventana del petróleo y tiene también un buen potencial. El Devónico inferior (Fm. Belén) aflora en San Pedro bajo el Cretácico. Se trata de lutitas negras muy potentes, pero los datos de pirólisis muestran un COT bastante bajo (las tres muestras tienen entre 0.2 y 0.45%), y parecen sobremaduras. Al oeste de San Pedro no se conocen afloramientos de Paleozoico. En los conglomerados del Terciario (Fm. Azurita) no se encontraron clastos de origen paleozoico. Se puede asumir que el Paleozoico no existía al oeste del sinclinal de Corque-Rosapata. Sobre las líneas sísmicas, las cuencas terciarias son tan profundas que no se vé nada por debajo.

Modelaje:

Hay que notar que la ausencia de datos de pozo para calibrar la sísmica y la gran profundidad de los sinclinales no permiten estar seguros de los reflectores ni de la conversión tiempo-profundidad. Hay una gran incertidumbre sobre la orientación de las fallas y sobre la presencia eventual de intrusivos. A pesar de estas complicaciones, en la figura 11 se presenta de forma esquemática un modelo sobre la evolución de la parte oeste del Altiplano central (sinclinal de Corque-Rosapata).

En el Oligoceno superior, los sedimentos de la Fm. Potoco rellenan y cubren un gran hemigraben desarrollado a partir de tres fallas normales con buzamiento al oeste, que se observan en las líneas sísmicas. En el mapa, este hemigraben tiene actualmente un borde oriental con rumbo N-S a la altura de San Pedro (figura 1), que cambia a una dirección NE-SW hacia el norte, al nivel de Chuquichambi. Esta geometría puede ser debida a una apertura durante una fase transtensional senestral, ya conocida del sur del Altiplano (Baby *et al.*, 1990) aunque no se puede descartar un origen transpresional. El espesor de la Formación Potoco en el hemigraben puede superar los 4.000 m, según datos sísmicos. A la altura de San Pedro, el espesor de la Formación Potoco fue deducido del nivel de madurez de las rocas madre, que indica igualmente un soterramiento de alrededor de 4.000 m. Hacia el este, el borde de la cuenca Potoco no se conoce, pero dentro de la Cordillera Oriental hay zonas donde las rocas madre cretácicas son inmaduras y, por tanto, nunca han sufrido un soterramiento de más de 3.000 m. Más al este, en el Subandino, no existen sedimentos eocenos.

Al final de la sedimentación de la Formación Coniri (*s.l.*) (18 Ma), en Cordillera-Oriental se produce una aceleración en la estructura, elevándose y cabalgando sobre el Altiplano, que continúa cerrado. Este último es alimentado desde el este, y la erosión de la Cordillera Oriental está marcada por la llegada masiva de conglomerados con clastos paleozoicos. En el borde de la Cordillera Oriental, los datos sísmicos muestran que la base de la secuencia Oligoceno-Mioceno está en discordancia erosiva y sella las primeras estructuras de compresión del sistema de fallas de Coniri. Mientras, al oeste, el pasaje entre la Formación Potoco y los conglomerados de la Formación Coniri es progresivo, como puede observarse en los afloramientos. Por tanto, para la Formación Coniri, podría hablarse de una discordancia progresiva.

En el Mioceno superior (10 Ma), la deformación se concentra más hacia el oeste, donde se producen las primeras inversiones de hemigraben. La dirección de la deformación andina es generalmente SW-NE, y el borde occidental del Altiplano que está orientado NW-SE es invertido por el desarrollo del cabalgamiento de Turco, mientras que el borde oriental, que está orientado N-S es invertido en un contexto transpresivo dextral y sus fallas se verticalizan. Hacia el norte, este borde cambia su dirección a NW-SE y se invierte totalmente hasta generar el cabalgamiento de Chuquichambi (figura 1). La inversión de este hemigraben, que constituye actualmente el sinclinal Corque-Rosapata, estuvo

TABLA 1:

Riqueza de las rocas madre (SPI) para cada subcuenca en t/m<sup>2</sup>:

Zona	Paleoz. inf	Paleoz. med	Carb.	Perm.	Cret.	Total
Norte Este	0 - 1	2 - 3	0 - 0.5	0 - 0.5	0 - 0.5	2 - 5.5
Norte Oeste	0 - 2	0	0	0	0 - 0.5	0 - 2.5
Centro Este	0 - 1	2 - 3	0	0	5 - 1.5	2.5 - 5.5
Centro Oeste	0 - 2	0 - 1	0	0	5 - 1.5	1.5 - 4.5
Sur	0 - 1	0 - 1	0	0	0 - 1	0 - 3

favorecida por la presencia de evaporitas en la base de la Formación Potoco, que son un excelente nivel de despegue, aflorando a la altura de Chuquichambi. Al este, el levantamiento de la Cordillera Oriental prosigue, y continúa constituyendo una fuente de alimentación de sedimentos para el Altiplano. Al oeste, más allá de Turco, los depósitos son volcanodetríticos debido a la influencia de la Cordillera Occidental. En el Plioceno (3 Ma), la inversión del hemigraben continúa, y el acortamiento del sinclinal Corque-Rosapata aumenta. En la actualidad continúan los fenómenos anteriores.

En la parte profunda del sinclinal (Fig. 12, a y b) el Cretácico entra en la ventana de petróleo, como en San Pedro durante la sedimentación de la Fm. Tiahuanacu, y se pone sobremadura durante la sedimentación de la formación Coniri (s.l.). Al oeste del sinclinal, oeste de la falla de Turco, la maduración del Cretácico continúa durante el Mioceno hasta la actualidad (Fig. 12, c y d): No hay erosión pliocuaternaria y el *timing* parece bueno. La cocina y área de drenaje actual posteriores a la falla de Turco son pequeñas, pero en el esquema propuesto todo el hemigraben estaba drenando hacia el prospecto durante el Oligo-Mioceno cuando se producía la migración.

#### Conclusiones:

La presencia del Paleozoico no está probada, pero el Cretácico podría tener un buen potencial y el Ordovícico podría participar en el sistema petrolífero actual. La ausencia de erosión pliocuaternaria y el desarrollo oligoceno de la estructura son elementos positivos desde un punto de vista petrolero. El esquema estructural y el potencial de la zona son todavía especulativos debido a la ausencia de pozos para calibrar la sísmica y poder conocer la columna pre-terciaria. Ninguno de los datos permiten eliminar esta zona como prospecto, y especialmente las estructuras como Santa Lucía. Posiblemente YFPB la perforó en este año en su esfuerzo de encontrar nuevas reservas en el Altiplano.

#### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS PETROLIFERAS

Desde un punto de vista general, y siguiendo los dominios estructurales descritos en el apartado anterior, se puede dividir el Altiplano en dos partes: una parte occidental con estructuras debidas a las inversiones del Mioceno superior-Plioceno a Cuaternario, y donde la presencia de roca madre es incierta; y una parte oriental, con estructuras más antiguas (Oligoceno-Mioceno), y donde las rocas madre son conocidas y con mejor potencial. En términos de SPI (Demaison & Huizinga, 1991), las zonas del Altiplano se comparan en la Tabla 1:

**Altiplano central:** La parte oriental (región del lago Poopó) es la zona con mejores perspectivas del Altiplano. Las estructuras son del Oligoceno-Mioceno, y por tanto anteriores a la migración de los hidrocarburos. En esta zona, las rocas madre cretácicas presentan el mejor potencial, mientras que las rocas madre paleozoicas probablemente son las más potentes. En la parte oeste, los prospectos están localizados en los puntos altos eocenos, pero la presencia de rocas madre es hipotética, con los riesgos que

conlleva esta situación. La falta de afloramientos de rocas terciarias implica que se necesita un pozo para saber si esta zona tiene o no potencial.

**Altiplano norte:** Al este, la deformación y la erosión son muy intensas y es difícil definir prospectos. Por lo tanto, la parte este del corte es muy poco prospectiva por la ausencia de estructuras y de sedimentación desde el Mioceno medio. Hacia el centro y el oeste, las rocas madre no son conocidas. En el pozo de San Andrés, el basamento se encontró bajo el Terciario y sólo 265 metros de Cretácico que tienen una facies arenosa y no parecen ser roca madre. El pozo de San Andrés está ubicado sobre un alto estructural eoceno, deformado y reactivado durante el Plioceno. Las rocas madre tienen un TR medio, pero la estructura puede ser alimentada por el sinclinal de Nazacara, donde la maduración ha sido continua desde el Oligoceno hasta la actualidad. El hecho de que este pozo esté seco parece condenar la parte central. Aunque el pozo está bien ubicado, no hay indicios de petróleo y no se encontró ningún reservorio.

Al oeste (cuenca de Mauri), el espesor de la Fm. Poloco no ha sido suficiente como para permitir la maduración de las rocas madre. El soterramiento vuelve a aumentar en el Mioceno superior y durante el Plioceno. Las estructuras eventuales debidas a la inversión pliocena serían de interés desde el punto de vista del "timing", pero como ya se comentó, no se conocen las rocas madre.

**Altiplano sur:** En la parte este de la falla Uyuni-Khenayani no hay ningún dato positivo en cuanto a rocas madre. El Cretácico es poco potente y de carácter arenoso, y el Devónico no existe. Los depósitos del Eoceno y Mioceno inferior son muy potentes y las estructuras son más recientes que la maduración. Además, la erosión cuaternaria es muy fuerte. Por tanto, las perspectivas de la región son muy pocas. En el centro, el Cretácico aflora en Corregidores y Culpina en facies arenosa (Fms. Aroifilla y Chaunaca) y calcárea (Fm. El Molino). El Devónico inferior está comprobado en Isla Grande y Corregidores, aunque su potencial como roca madre no es del todo conocido. Hacia el oeste, las estructuras se deben en gran parte a tectónica por diapirismo de evaporitas, y son transpresivas. Existen grandes espesores de sal en la base del Eoceno (Fm. Potoco). No se ha comprobado la presencia de rocas madre. La existencia de reflectores sísmicos profundos permite pensar en la preservación de cuencas permo-triásicas a cretácicas bajo las estructuras de Inés, Juliaca y Cobrizos, aunque no existen datos de superficie, ya que sólo aflora el Terciario. Las estructuras salinas no tienen perspectivas, debido a que los reservorios serían muy profundos y la sal constituye una barrera para la migración.

Como se puede observar sobre la tabla 1, el Altiplano central-este es la única zona donde los datos actuales nos permiten definir con seguridad un potencial petrolífero ( $SPI > 2 \text{ U/m}^2$ ). En todas las otras partes, los datos de superficie no permiten establecer conclusiones, y hay que esperar la perforación de varios pozos para poder definir o eliminar posibilidades interpretativas. Esto mismo se puede decir para toda la parte central-oeste.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó por medio de un convenio de investigación entre YPF y ORSTOM. Los datos provienen de la base de datos de YPF-GXG, y algunos de ellos fueron recolectados recientemente en un trabajo de campo con participación de la compañía petrolífera TOTAL. Una gran parte de la interpretación estructural fue hecha por P. Baby (ORSTOM) y Ph. Rochat (Univ. de Grenoble). Agradecemos a la División de Exploración del Altiplano (J. Jarandilla, E. Martínez y G. Navarro) por su ayuda, a M. Specht de la TOTAL por su participación en la definición del esquema estructural, y a E. Díaz Martínez de ORSTOM por su contribución sobre el Paleozoico del Altiplano y en la corrección del texto. Queremos agradecer a los ejecutivos de la Gerencia de Exploración de YPF, Ings. M. Cirbian y M. López por su constante apoyo a nuestro trabajo, y por permitir publicar este artículo.

## REFERENCIAS

- ARANIBAR, O., M. CIRBIAN & S. TALUKAR, 1995. The Molino-Tertiary petroleum system in the southern and central Altiplano and adjacent Eastern Cordillera, Bolivia. *AAPG Annual Convention*, Houston (Texas), Marzo 1995.
- ASCARRUNZ, R., 1973. Estudio estructural de la Región Norte de la falla Coniri. *Boletín de la Soc. Geol. Boliviana*, 19 : 75-81.
- BABY, P., G. HERAIL, M. LOPEZ, O. LOPEZ, J. OLLER, J. PAREJA, T. SEMPERE & D. TUFIÑO, 1989a. Structure de la zone subandine de Bolivie : influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309 : 1717-1722.
- BABY, P. & T. SEMPERE, 1989b. Interpretación geológica de la parte meridional del Altiplano Sur. *Convenio YPF-ORSTOM, Publicaciones de la Misión ORSTOM en Bolivia*, Informe N°15, 36 p.
- BABY, P., T. SEMPERE, J. OLLER, L. BARRIOS, G. HERAIL & R. MAROCCO, 1990. Un bassin en compression d'âge oligomocène dans le sud de l'Altiplano bolivien. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311 : 341-347.
- BABY, P., T. SEMPERE, J. OLLER & G. HERAIL, 1992a. Evidence for major shortening on the eastern edge of the Bolivian Altiplano: the Calazaya nappe. *Tectonophysics*, 205 (1-3) : 155-169.
- BABY, P., G. HERAIL, R. SALINAS & T. SEMPERE, 1992b. Geometry and kinematic evolution of passive roof duplexes: examples from the foreland thrust system of the Subandean belt of Bolivia. *Tectonics*, 11 (3) : 523-536.
- BABY, P., B. GUILLIER, J. OLLER & G. MONTEMURRO, 1993. Modèle cinématique de la Zone Subandine du Coude de Santa Cruz (entre 16°S et 19°S, Bolivie) déduit de la construction de cartes équilibrées. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 317 : 1477-1483.
- BLANC-VALLERON, M.M., M. SCHULER, R. RAUSCHER, G. CAMOIN & J.-M. ROUCHY, 1994. La matière organique des séries d'âge Crétacé supérieur-Tertiaire inférieur du bassin de Potosí (Cordillère orientale, Bolivie): apports stratigraphiques et paléogéographiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 319 : 1359-1366.
- CHERRONI, C., 1974. Geología de la región de Coro Coro. *Revista Técnica de YPF*, 4 (3) : 125-154, Santa Cruz.
- CROUGH, T., 1983. Apatite fission-track dating of erosion in the eastern Andes, Bolivia. *Earth and Planetary Science Letters*, 64 : 396-397.
- DEMAISON, G. & B. J. HUIZINGA, 1991. Genetic classification of Petroleum systems. *Bull. AAPG*, 75 : 1626-1643.
- DIAZ-MARTINEZ, E., 1991. Litoestratigrafía del Carbonífero del Altiplano de Bolivia. *Revista Técnica de YPF*, 12 (2) : 295-302, Santa Cruz.
- DIAZ-MARTINEZ, E., 1995. Devónico superior y Carbonífero del Altiplano de Bolivia. Estratigrafía, sedimentología y evolución paleogeográfica. ORSTOM, Bolivia, Informe No. 46, 164 p.
- DORBATH, C., M. GRANET, G. POUPINET & C. MARTINEZ, 1993. Teleseismic study of the Altiplano and the Eastern Cordillera in northern Bolivia: new constraints on a lithospheric model. *J. Geophys. Res.*, 98 (6) : 9825-9844.
- EVERNDEN, J. F., S. KRIS & C. CHERRONI, 1977. Potassium-argon ages of some Bolivian rocks. *Economic Geology*, 72 : 1042-1061.
- GAYET, M., T. SEMPERE, H. CAPPETTA, E. JAILLARD & A. LEVY, 1993. La présence de fossiles marins dans le Crétacé terminal des Andes centrales et ses conséquences paléogéographiques. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 102 : 283-319.
- GEISE, P., 1994. Geothermal structure of the Central Andean crust - Implications for heat transport and rheology. In *Tectonics of the southern central Andes*, Springer-Verlag : 69 - 76.
- GRANT, J. L., C. HALLS, W. AVILA & N. J. SNELLING, 1979. K-Ar ages of igneous rocks and mineralization in part of the Bolivian tin belt. *Economic Geology*, 74 : 838-851.
- HENRY, S. & H. POLLACK, 1988. Terrestrial heat flow above the Andean Subduction Zone in Bolivia and Peru. *J. Geophys. Res.*, 93 (12) : 15153-15162.
- HERAIL, G., P. BABY, T. SEMPERE, J. OLLER, L. BARRIOS, G. MONTEMURO & R. SALINAS, 1990. Structural cross-section in Southern Bolivia. Final workshop : Structure and evolution of the Central Andes in northern Chile, southern Bolivia, and northwestern Argentina. *Berlin, Freie Univ. Berlin - Tech. Univ. Berlin*, 1, Abstracts : 53.
- HERAIL, G., P. SOLER, M. G. BONHOMME & J. L. LIZECA, 1993. Evolution géodynamique du contact Altiplano - Cordillère Orientale au Nord d'Oruro (Bolivie) - Implications sur le déroulement de l'orogénèse andine. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 317 : 515-522.
- HOFFSTETTER, R., C. MARTINEZ & P. TOMASI, 1972. Nouveaux gisements de mammifères néogènes dans les couches rouges de l'Altiplano bolivien. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 273 : 739-742.
- JAILLARD, E., 1994. Tectonic evolution of the Peruvian margin between Kimmeridgian and Paleocene times. in : Salfity J.A., éd., *Cretaceous tectonics in the Andes*, Vieweg Pub., Braunschweig/Wiesbaden (Allemagne), *Earth Evolution Sciences*, Monograph series, 1 : 101-167.
- JAMES, D., 1971. Andean crustal structures. *Journal of Geophys. Res.*, 76 : 3246-3271.



- LAVENU, A., 1986. Etude néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère Orientale de Bolivie. *Thèse Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences (spécialité Sciences Naturelles)*, 434 p., Univ. Université Paris Sud - Orsay.
- LAVENU, A., M.G.BONHOMME, N.VATIN-PERIGNON & P. de PACHTERE, 1989. Neogene magmatism in the Bolivian Andes between 16° and 18° S. Stratigraphy and K-Ar geochronology. *J. South Amer. Earth Sci.*, 2 (1) : 35-47.
- LEHMANN, B., 1978. A Precambrian Core sample from the Altiplano/Bolivia. *Geol. Rundschau*, Stuttgart : 270-278.
- MAROCCO, R., T.SEMPERE, M.CIRBIAN & JOLLER, 1987. Mise en évidence d'une déformation paléocène en Bolivie du Sud. Sa place dans l'évolution géodynamique des Andes Centrales. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 304 (18) : 1139-1143.
- MARSHALL, L. G., C.SWISHER, A.LAVENU, R.HOFFSTETTER & G.CURTIS, 1992. Geochronology of the mammal-bearing late Cenozoic on the northern Altiplano, Bolivia. *J. South Amer. Earth Sci.*, 5(1) : 1-19.
- MEYER, H. C. M. J., 1964. Sobre la geología de las Provincias Aroma, Pacajes y Carangas. *Bol. Depto. Nat. Geol. La Paz - Bolivia*, 1.
- MORETTI, I., 1994. Modelaje geoquímico de los prospectos del Altiplano. *Informe YPFB*.
- MORETTI, I., P.BABY, O.ARANIBAR & P.ROCHAT, 1995. Evaluación del potencial petrolero del Altiplano de Bolivia. *Informes YPFB-ORSTOM-TOTAL*.
- MORETTI, I., E.DIAZ MARTINEZ, E.AGUILERA, G.MONTEMURRO & M.PÉREZ, 1994 (en prensa). Las rocas madre de Bolivia y su potencial petrolífero: Subandino - Madre de Dios - Chaco. *Revista Técnica de YPFB*, este volumen.
- MUÑOZ, N.E., 1989. Estudio geológico y estratigráfico de las Hojas Baquedano y Pampa Unión II, Región de Antofagasta, Chile. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago*.
- MUÑOZ, N.E. & R.CHARRIER, 1993. Jurassic-early Cretaceous facies distribution on the western Altiplano (18°-21°30'SL). Implication for hydrocarbon exploration. In ISAG symposium, Andean Geodynamics, Extended Abstracts, Oxford Sept 93 : 307-310.
- JOLLER, J., 1992. Cuadro cronoestratigráfico de Bolivia. *Publicación interna, YPFB, Bolivia*.
- PRINZ, P., A.WILKE & A.Von HILLEBRANDT, 1994. Sediment accumulation and subsidence history in the Mesozoic Marginal Basin of Northern Chile. In *Tectonics of the southern central Andes*, Springer Ed. : 219 - 232.
- ROCHAT, P., G.HERAIL & P.BABY, 1995 (en prensa). Analyse géométrique et modèle tectono-sédimentaire de l'Altiplano nord Bolivien. *C.R.Acad.Sci. Paris*, (presentado).
- ROCHAT, P., These, Université de Grenoble, en prep.
- ROEDER, D., 1988. Andean-age structure of Eastern Cordillera (Province of La Paz, Bolivia). *Tectonics*, 7 (1) : 23-39.
- SEMPERE, T., G.HERAIL, JOLLER & M.BONHOMME, 1990a. Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia. *Geology*, 18 : 946-949.
- SEMPERE, T., 1990. Cuadros estratigráficos de Bolivia: propuestas nuevas. *Revista Técnica de YPFB*, 11 : 215-227, Santa Cruz.
- SEMPERE, T., 1994. Kimmeridgian? to Paleocene tectonic evolution of Bolivia. in : Salfity J.A., éd., *Cretaceous tectonics in the Andes*, Viewing Pub., Braunschweig/Wiesbaden (Allemagne), Earth Evolution Sciences, Monograph series : 168-212.
- SHEFFELS, B., 1990. Lower bound on the amount of crustal shortening in the central Bolivian Andes. *Geology*, 18 : 812-815.
- SMOJE, I., 1989. Estratigrafía y facies del Sistema Jurásico en la Precordillera entre las latitudes de Pica y Quillagua. *Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago*.
- SOLER, P., G.HERAIL, J.L.LIZECA & M.G.BONHOMME, 1992. Tectónica, magmatismo y erosión al contacto entre el Altiplano y la Cordillera Oriental al Norte de Oruro - Implicaciones sobre la orogénesis andina en Bolivia. X Cong. Geol. Boliviano, La Paz, Resúmenes extendidos, *Boletín de la Sociedad Geológica Boliviana*, 27 : 168-172.
- SWANSON, K. E., D.C.NOBLE, E.H.McKEE, T.SEMPERE, C.MARTINEZ & M.CIRBIAN, 1987. Major revisions in the age of rock units and tectonic events in the northern Altiplano basin of Bolivia. *Geological Society of America Meeting*, 1. Abstracts with Programs, 19 : 456.
- TROENG, B., E.SORIA, H.CLAURE, R.MOBAREC & F.MURILLO, 1994. Descubrimiento de basamento precámbrico en la cordillera occidental Altiplano de los andes Bolivianos. In XI Congreso Geológico Boliviano, 231-237, Santa Cruz.
- WIGGER, P. J., M.SCHMITZ, M.ARANEDA, G.ASCH, S.BALDUHN, P.GIESE, W.D.HEINSOHN, E.MARTINEZ, E.RICALDI, P.RÖWER & J.VIRAMONTE, 1994. Variation in the Crustal Structure of the Southern Central Andes Deduced from Seismic Refraction Investigations. in : K.-J. Reutter E. Scheuber P.J. Wigger, éd., *Tectonics of the Southern Central Andes - Structure and Evolution of an Active Continental Margin*, Springer-Verlag, Berlin, 1 : 23-48.
- WITSCHARD, F., 1992. Chilla - A probable ophiolitic complex in a major suture zone. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz - Bolivia, Resúmenes y Programas : 206.