

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
Sesiones Generales: "Energía y Sociedad, aliados inseparables"

CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO ESTRUCTURAL Y EN LA EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS PETROLÍFEROS DEL SUBANDINO NORTE DE BOLIVIA

Luis Angel Constantini¹, Frederic Schneider¹, Jorge David Gutiérrez Tórrez²,
Javier Roberto Esquivel Sánchez²

1: BeicipFranlab, lconstantini.arg@gmail.com, frederic.schneider@beicip.com

2: YPFB, jdgutierrez@ypfb.gob.bo, jresquivel@ypfb.gob.bo

Keywords: Bolivia Northern Subandean, Thrust and fault belt, Sedimentary wedge, Petroleum systems, Timing

ABSTRACT

The thrust-and-fault belt (TFB) of the northern Subandean of Bolivia is still a frontier exploratory area, with no commercial discoveries to date. In the last 9 years, new efforts have been made in the acquisition of information, regional and local interpretations in order to achieve a better understanding of the structural architecture and petroleum systems in such a way that they make it possible to identify exploratory opportunities, understand synchronism (timing) and reduce risks. This "thin skinned" TFB is the result of transmission of shortening of at least two deeper ("thick skinned") detachments that are part of the Eastern Cordillera. Deformation began at ~23 Ma in the west, being younger than 2 Ma in the eastern part of the basin. Shortening would have occurred through major detachments located within Ordovician, Silurian and Devonian sediments. Although with more localized development, the Copacabana formation (Upper Carboniferous-Lower Permian) has a significant importance because of its plastic fluency, generating important disharmonies between the lower and upper levels.

The sedimentary wedge involved in the deformation presents particularities that control the development and configuration of this TBF. The Paleozoic sedimentary column, which contains the main units that favor the development of the detachments, wedges towards the Northeast onlapping the basement, being truncated progressively by the erosional pre-Jurassic unconformity.

The current development of a basement-involved tectonics, the result of inversion of old extensive faults, generates incipient folds in the overlying TFB.

The description of numerous oil seeps indicates the existence of active petroleum systems although many of those surface emanations can be interpreted as a result of decompression. The available information allows classifying the Copacabana formation as a good source rock. The Devonian formations (Tomachi and Tequeje) have good generating potential but data are still lacking to characterize them fully.

The thermal calibration associated with AFT and ZFT data indicate the existence of a thermal event that took place at the end of the Triassic. Therefore, the geochemical models calculate two expulsion pulses. The most important one occurred at the end of the Triassic - early Jurassic. The second pulse, related to the Andean tectonics, can be subdivided locally into two phases: a phase before the tectonic loading and another phase associated with sedimentation and erosion.

INTRODUCCIÓN

El Subandino Norte de Bolivia (SANB) incluye un área aproximada de 42800 km², se alinea con rumbo general noroeste-sureste y se extiende, según Suarez Soruco (2000), desde la frontera con Perú hasta el Río Chapare (13° a 17° latitud Sur). Entre 17° y 18° de latitud Sur (ríos Chapare y Yapacaní) forma una inflexión por interferencias con la zona del Boomerang y el mismo autor lo llama Subandino Central.

El SANB limita al Norte con la Cuenca Madre de Dios, con la llanura del Beni al Este-Noreste, al Sur con el Subandino Sur y al Oeste-sudoeste con la Cordillera Oriental (lineamiento de fallas Teoponte – San Lorenzo – San José) (Figuras 1 y 2). En este trabajo se considera que la latitud de 17° S es el límite aproximado entre ambos Subandinos y no se tiene en cuenta la parte central como una unidad morfoestructural separada. Históricamente, el extremo sudoeste de esta faja fallada y plegada (FFP) fue considerada como una subunidad diferente, denominándola Interandino (Baby et al., 1997, McQuarrie et al., 2008, Hernández et al., (2011 y 2013), entre otros) e interpretando un estilo de deformación diferente al resto del Subandino. En este estudio se asume que esta zona no presenta características diferentes al resto de la faja plegada de piel fina y solo se encuentra re-plegada y elevada por el avance de la estructura profunda del frente de deformación de la CO.

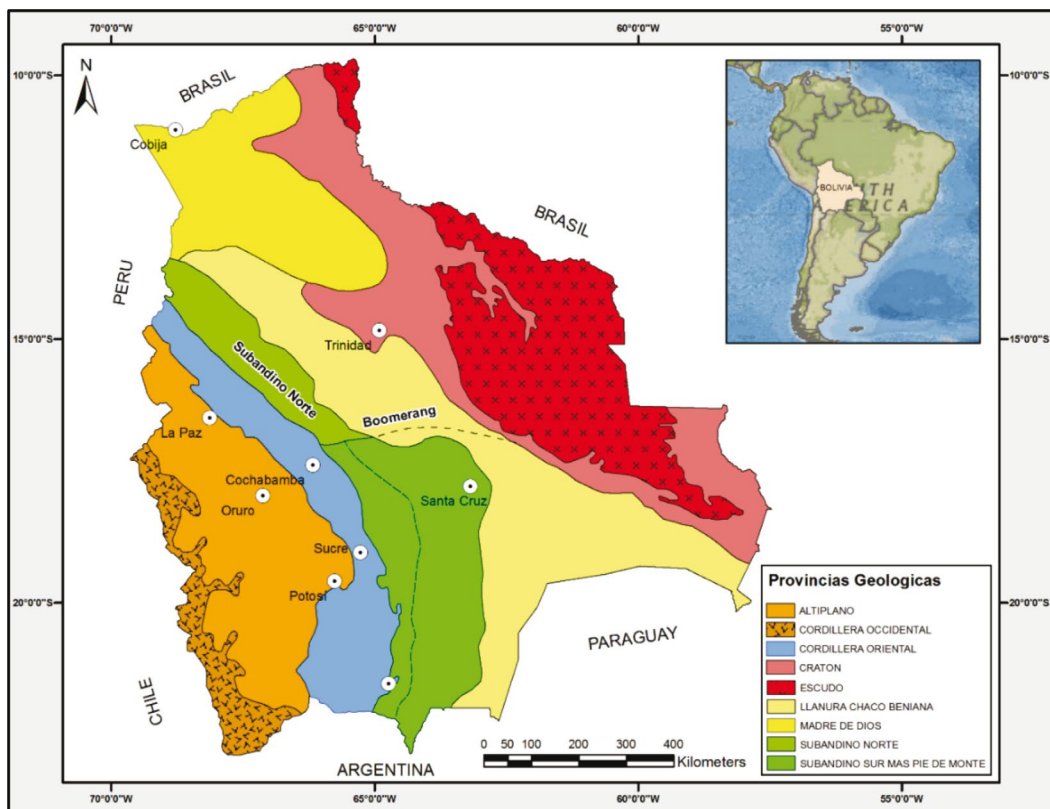


Figura 1. Ubicación regional del Subandino Norte de Bolivia.

En los últimos años se logró un importante avance en el conocimiento de la arquitectura estructural, la cinemática y los sistemas petrolíferos presentes en la FFP del SANB gracias a la adquisición de nueva información (mapeo de superficie, levantamiento de perfiles estratigráficos, dataciones absolutas y termo-cronológicas, bioestratigrafía, magneto-estratigrafía, geoquímica) en un gran porcentaje del área de esta provincia geológica. Esto permitió ajustar la información histórica disponible llevada a cabo por Hernández et al., (2011 y 2013). Además, se adquirieron 1087 km lineales de sísmica 2D, información que fue procesada y migrada en tiempo y en profundidad (PSTM-PSDM) con objetivo principal en el bloque Lliquimuni.

En este estudio se trató de obtener una nueva interpretación de la deformación tectónica del Subandino Norte de Bolivia, avanzar en el entendimiento de la cinemática de la deformación y mejorar el conocimiento de los sistemas petroleros presentes.

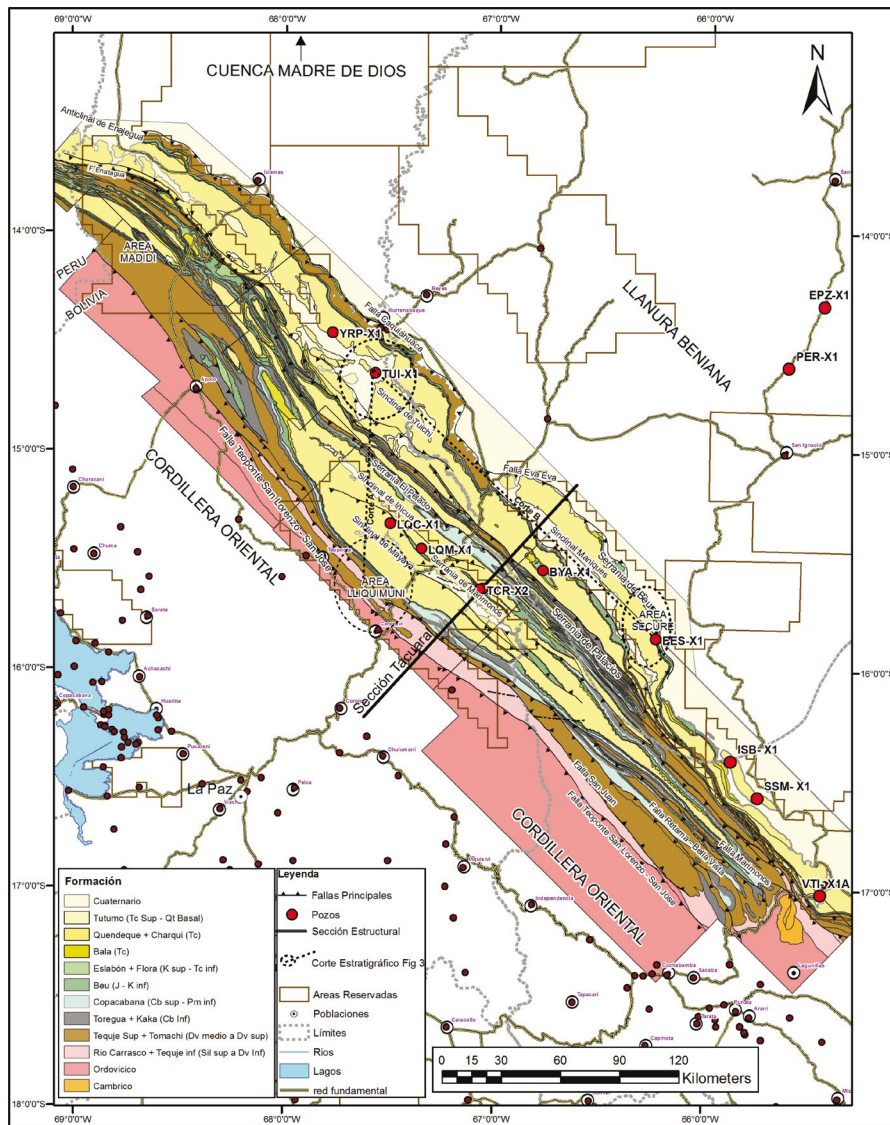


Figura 2. Mapa geológico de superficie actualizado del Subandino Norte de Bolivia, con los pozos perforados hasta la actualidad, la traza de la sección estructural Tacuaral y del corte estratigráfico.

METODOLOGÍA

Con la información disponible se interpretó la sección estructural Tacuaral, la cual tiene el máximo soporte de datos. Se probaron diferentes hipótesis geométricas y cinemáticas. Con esta interpretación como marco de referencia (Fig 2), se realizaron otros estudios regionales y subregionales, con especial énfasis en el área exploratoria Lliquimuni (Fig 2), donde se centraban las principales expectativas exploratorias. La evaluación de los sistemas petrolíferos fue realizada primero a escala regional hasta lograr un modelo consistente y luego localmente con mayor detalle en los casos de interés. Todo el proceso tuvo como objetivos principales identificar trampas estructurales (leads y prospectos), analizar los sistemas petroleros y el sincronismo (timing), el cual se estimó como principal factor de riesgo en la región.

ANTECEDENTES

En el SANB se realizaron diversos trabajos de exploración, con muchas intermitencias, durante más de un siglo, aunque ninguno de ellos realizó una integración regional. Por ejemplo, entre 1903

POZO	SIGLA	AÑO	EMPRESA	TD (MD en mppb)	Fm. FONDO	RESULTADO	OBSERVACIONES
CERRO BOYA-X1	BYA-X1	1962	Bolivian Gulf Oil Co.	3038.6	Silúrico? 56 m (Probable Devónico?)	Seco	Probable falta de llenado: timing? Trampa: probable falla del cierre lateral.
TACUARAL X-1 & x1D	TCR-X1, X1D	1993 / 94	YPFB	3475.8	Fm. Copacabana (Cb. sup. - Pérmico)	Seco	Shows. No verificó trampa.
TACUARAL X-2	TCR-X2	1994	YPFB	3765	Gr. Retama (Cb. Inf)	Seco	Shows. No verificó trampa.
LLIQUIMUNI-X1	LQM-X1	1992	YPFB	4596.4	Fm. Copacabana (Cb.sup. - Pérmico inf.)	Seco	Shows. No verificó trampa.
TUICHI-X1	TUI-X1	1976	Bolivian Sun Oil Co.	4627.6	Fm. Beu (Jurásico-Cretácico)	Seco	Carga. Timing?
YARIAPO-X1	YRP-X1	1996	Total Oil & gas Exploration B.V.	4258	Fm. Beu (Jurásico-Cretácico)	Seco	Carga. Timing?
LLIQUIMUNI CENTRO-X1	LQC-X1	2015	YPFB Petroandina SAM	4562	Fm. Copacabana (Permo-Carbonífero)	Seco	Shows. No verificó trampa.
EVA EVA SUR-X1 (ST)	EES-X1 ST	2000	REPSOL YPF	5830	Basamento	No Económico	Productor 177 BBL/día Fm. Beu (42 API)
ISIBORO-X1	ISB-X1	1962	TESORO BOL.	3769	Fm. Quendeque (Terciario)	Seco	Carga. Timing?
SASASAMA-X1	SSM-X1	1967	BOLIVIAN OIL	3419	Fm. Quendeque (Terciario)	Seco	Carga. Timing?
VILLA TUNAR-X1	VTI-X1	1998	REPSOL YPF	3091	Cancañiri (Silurico)	Seco	Indicios de hidrocarburos (15 Bbls totales de petróleo de 51° API y 1700 Bbls de agua).

Tabla 1. Síntesis de los pozos exploratorios perforados en el Subandino Norte de Bolivia.

y 1926 se realizaron trabajos de campo a lo largo del Río Beni y zonas cercanas, desde Caupolicán hasta Rurrenabaque. Desde 1939 a 1959 siguieron algunos reconocimientos de orden regional, tanto por la compañía estatal (YPFB), como por el Instituto Boliviano del Petróleo y la internacional Standard Oil. En 1962, Bolivian Gulf perforó el primer pozo exploratorio (Cerro Boya-X1) sin resultados positivos. En total se perforaron 11 pozos exploratorios sin lograr descubrir acumulaciones económicas de hidrocarburos. Una síntesis de dichos pozos se muestra en la tabla 1.

ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

El prisma sedimentario involucrado en la deformación, entre la Cordillera Oriental y el piedemonte, está representado por unidades que abarcan un período de tiempo desde el Cámbrico hasta el Neógeno (Fig. 3). En Hernández et al., (2011 y 2013) se profundiza con detalle en el análisis del mismo.

Cámbrico

Es la parte más antigua de la columna y no aflora en el frente Nororiental de la CO. Depósitos marinos adjudicados al Cámbrico se encuentran expuestos en la zona de la inflexión en el Sureste entre el Subandino Norte y Sur (zona del Chapare), constituido por las formaciones Putintiri (facies marinas litorales) y Avispas (areniscas calcáreas, margas y yeso depositados en ambiente marino cálido y anóxico).

Ordovícico

Este ciclo se caracterizó por un clima cálido a nivel mundial, con niveles de mar alto. la sedimentación en este período se caracteriza por cortejos sedimentarios desarrollados en una plataforma marina sometida a tormentas periódicas y eventos turbidíticos, intercalados con sedimentación tranquila en el offshore (formaciones Río Coroico - Enadere), progradaciones de facies proximales en el tope (formaciones Amutara – Tarene) .

Según Benedetto (2012), el registro sedimentario forma parte de la Cuenca Andina Central y alcanza 9000 m de espesor en el Sur de CO boliviana, depositados en continuidad con el Cámbrico. Estos estudios fueron realizados en la cuesta de Sama, al Noroeste de la ciudad de Tarija, locación que se encuentra a más de 400 km al Sur del extremo austral del Subandino Norte. En la CO del Norte de Bolivia, se reconocieron solamente sedimentos del Ordovícico medio a superior, separados del Cámbrico mediante un hiatus y se midieron 2400 m (parcial), aunque con soporte sísmico se estimaron ~ 3500 m.

Según Suarez Soruco (2000), los depósitos sedimentarios del Ordovícico tienen un control distensivo en la generación de espacio (rift). Analizando la información sísmica del Subandino Norte, se observaron rasgos que sugieren dicho control.

Silúrico – Devónico

Este ciclo se inicia con un período glacial con depositación de diamictitas (Formación Cancañiri), las cuales apoyan en discordancia sobre el registro Ordovícico. Le sigue la Formación Río Carrasco (Silúrico superior), compuesta de lutitas oscuras, parcialmente alteradas, deleznales, color gris claro a oscuro y areniscas en su tope. La Formación Tequeje (Devónico inferior-medio) suprayace a la anterior sin mediar una interrupción en la sedimentación, conformada predominantemente por facies pelíticas distales. El ciclo es coronado por la Formación Tomachi (Devónico Superior), areno-pelítica, organizada en ciclos grano y estrato crecientes, desarrollados en ambiente marino.

Carbonífero – Pérmico inferior

El registro sedimentario está conformado por el Grupo Retama (Carbonífero inferior a medio) con sus formaciones Toregua y Kaka, constituidas por facies diamictíticas (dominantes durante los periodos glaciares) y progradaciones deltaicas (durante los intervalos de deglaciación o ascensos del nivel de base). Durante el Carbonífero superior – Pérmico inferior, la migración del paleo polo en el Oeste de Gondwana favoreció el cambio climático en la región, provocando ascenso de temperatura. En este período se depositaron calizas, lutitas y areniscas eólicas que conforman la Formación Copacabana. Esta unidad, en algunos sectores del Subandino Norte (especialmente en el área Lliquimuni) presenta una gran plasticidad durante la deformación andina debido a la presencia de importantes espesores de pelíticos.

Jurásico – Cretácico

Conformado por la Formación Beu, con depósitos de areniscas eólicas amarillentas a blanquecinas, con delgadas intercalaciones de arcillas rojas y gris verdosas, principalmente localizadas cerca a la base y tope de la unidad. La separación del sustrato es mediante una importante discordancia regional (pre-Jurásico/Triásico), suavemente angular, que en algunos lugares llega a erosionar depósitos del Devónico. Cabe destacar que el prisma sedimentario paleozoico se acuña contra la periferia del basamento del cratón de Brasil (Alto de Maididi). Se interpretó que este acuanamiento se produjo por efecto de onlap de los sedimentos paleozoicos sobre el basamento y por la erosión producida por la discordancia en la base de la Formación Beu. La desaparición

del registro Paleozoico implica la eliminación de las unidades en las cuales se desarrollaron los despegues principales. Por lo tanto, por lo menos en buena parte de la extensión de esta faja plegada se ha alcanzado el límite máximo nororiental de avance del orógeno.

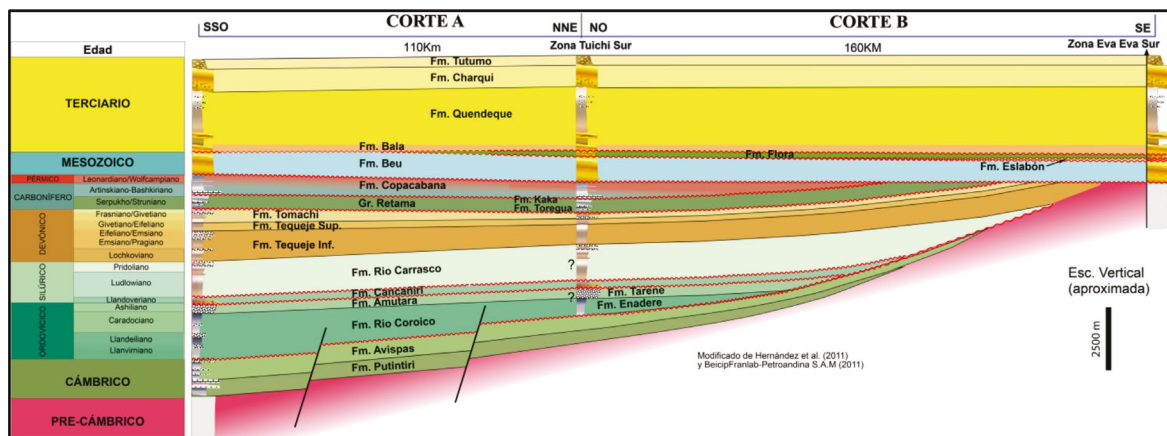


Figura 3. Corte estratigráfico que representa el prisma sedimentario crono-litoestratigráfico regional del Subandino Norte de Bolivia, realizado a partir de columnas estratigráficas idealizadas en las zonas: Occidental de Mayaya - CO, Tuichi Sur - Chaquihuaca y Eva Eva Sur, utilizando información de afloramientos, pozos y soporte sísmico (ubicación en Fig 2).

Cretácico superior

En el Oeste del Subandino Norte no se identificaron depósitos que puedan atribuirse a este tiempo geológico. Se desarrollan o encuentran preservados hacia el centro-Noreste de la comarca. El registro sedimentario se agrupa en las formaciones Eslabón y Flora, la primera constituida por facies fluvio-lacustres depositadas en condiciones de clima árido a semi-árido y la última conformada por arcilitas marrón rojizo a violáceo, blandas, plásticas, con algunas delgadas intercalaciones de anhidrita, calizas arcillosas y nódulos calcáreos.

Terciario

Los depósitos de edad terciaria en algunos sectores (por ej. Sinclinal Inicua, área Lliquimuni) alcanzan hasta más de 6000 m de espesor (dato extraído de líneas sísmicas), compuestos por facies fluviales efímeras, llanuras de inundación, ríos entrelazados y abanicos aluviales. Es el resultado del relleno de la cuenca de antepaís durante la evolución del orógeno andino (formaciones Bala, Quendeque, Charqui y Tutumo). Formación Bala: Conformada por areniscas fluviales, en cortejos sedimentarios que van desde depósitos de ríos entrelazados al Oeste, hasta meandriiformes y llanuras de inundación hacia el Este y representan el registro basal de la cuenca de antepaís. Formación Quendeque: Constituye una unidad con una alternancia de arcillas, limolitas y areniscas rojas en la base. Las arcillas son dominantes hacia el tope. Su edad es Oligoceno superior? - Mioceno y

se desarrolla progresivamente a partir de las areniscas de la Formación Bala. Formación Charqui: Unidad compuesta por potentes bancos de areniscas de grano fino a grueso, mal seleccionadas, con intercalaciones de arcillas rojas, particularmente en su parte inferior. Presenta bancos de conglomerados en diferentes niveles. Probablemente parte de este registro sedimentario corresponda a ciclos sin-crecimiento. Formación Tutumo: Facies continentales gruesas que en este trabajo se las asume como el registro sedimentario de estadios de cuencas de piggyback.

Este ciclo sedimentario es importante para entender la evolución de la FFP. Por esta razón es crítico conocer, con la mayor precisión posible, las edades de sedimentación y definir las unidades tecto-sedimentarias desarrolladas antes y durante el crecimiento de las estructuras (pre-crecimiento/sin-crecimiento).

Según las correlaciones realizadas a partir los estudios magneto-estratigráficos en el bloque Lliquimuni (Hernández et al., 2013), la sedimentación del Terciario se extendió desde el Oligoceno superior - Mioceno inferior? (~ 23 – 24 Ma) hasta el Mioceno superior (~6,9 Ma) y sucedió de manera bastante continua, con un hiatus entre ~ 14 y 11 Ma. En este período de tiempo (~ 17 Ma) se midieron alrededor de 4400 m de espesor sedimentario, correspondiendo a una tasa promedio de sedimentación de 0,264 mm/año. También se realizaron dataciones U-Pb sobre circones detríticos obtenidos de muestras extraídas de cuatro perfiles estratigráficos de superficie: Río Kaka, Río Alto Beni, Río Beni y Río Quiquibey (Fig 4). Tomando los resultados más representativos, como el caso de la muestra del perfil Río Quiquibey (~ 25 Ma), extraída a 295 m sobre la discordancia del tope

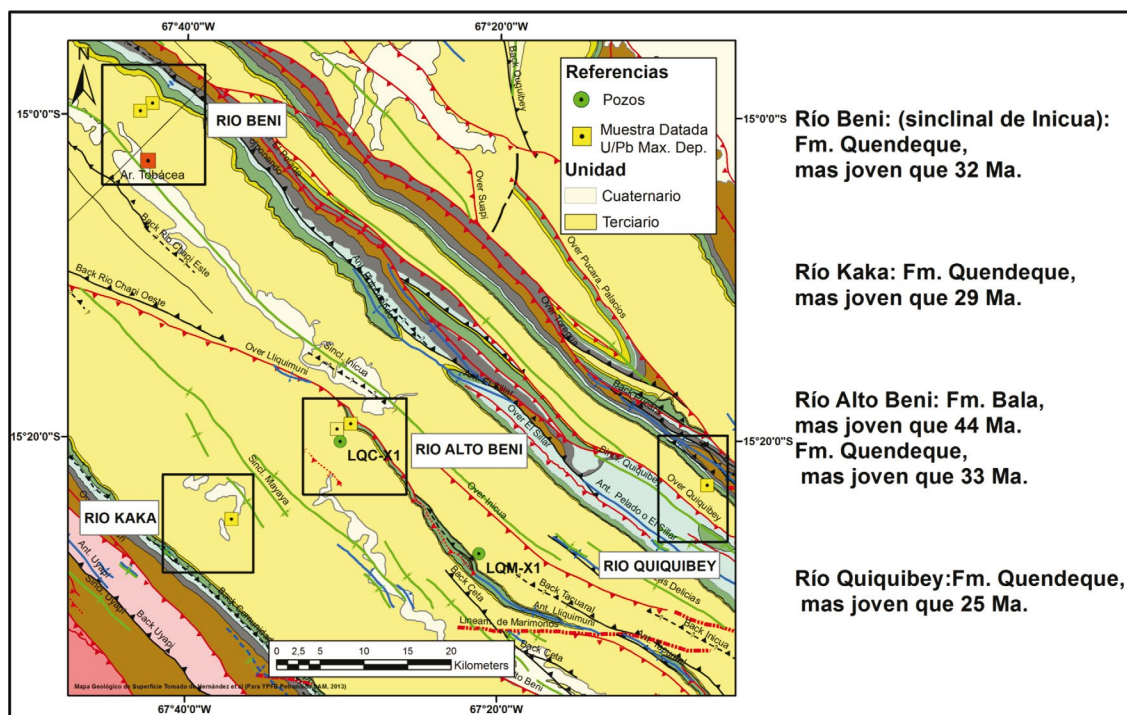


Figura 4. Mapa de ubicación de las muestras analizadas de los perfiles estratigráficos levantados en superficie y síntesis de las edades máximas de depositación determinadas por U-Pb (Hernández et al., 2011 y 2013) que podrían adjudicarse al tiempo de depósito de los circones analizados.

de la Formación Beu (Jurásico-Cretácico inferior), la edad de la base de la Formación Quendeque es mayor a 25 Ma. Si se acepta esta datación como válida y se considera que las demás (mayor a 26 Ma para la Formación Quendeque) no son representativas, es posible afirmar que el inicio de la sedimentación de esta unidad en Quiquibey sucedió a ~26 Ma y la edad de la Formación Bala se debe haber depositado dentro del lapso comprendido entre 43 a 26 Ma.

DEFORMACIÓN TECTÓNICA

La interpretación estructural regional se realizó desde la Cordillera Oriental (CO) hasta el Piedemonte (límite Sur-Occidental de la Llanura Beniana) con varias secciones balanceadas, las cuales poseen soporte con variable cantidad y calidad de datos (Beicip-Regional 2015 c, 2016 e, 2016 g, 2016 h y 2017 b). La sección Tacuaral (Fig 2 y 5) es la que tiene el máximo soporte de datos y en la cual se refleja el estilo estructural de la región. Además, durante los estudios exploratorios recientes, se realizaron 14 secciones estructurales subregionales (total: 600 km), concentradas en el bloque Lliquimuni (BEICIP-Proyecto 2017 u), con las cuales se identificaron estructuras anticlinales por debajo de la Formación Copacabana, que definieron la propuesta de un nuevo pozo exploratorio en el sinclinal de Mayaya (Fig 5). El principal soporte sísmico de la sección Tacuaral es la línea A (PSDM) (Fig 6), con una longitud de 75.8 km, con extremo SO próximo

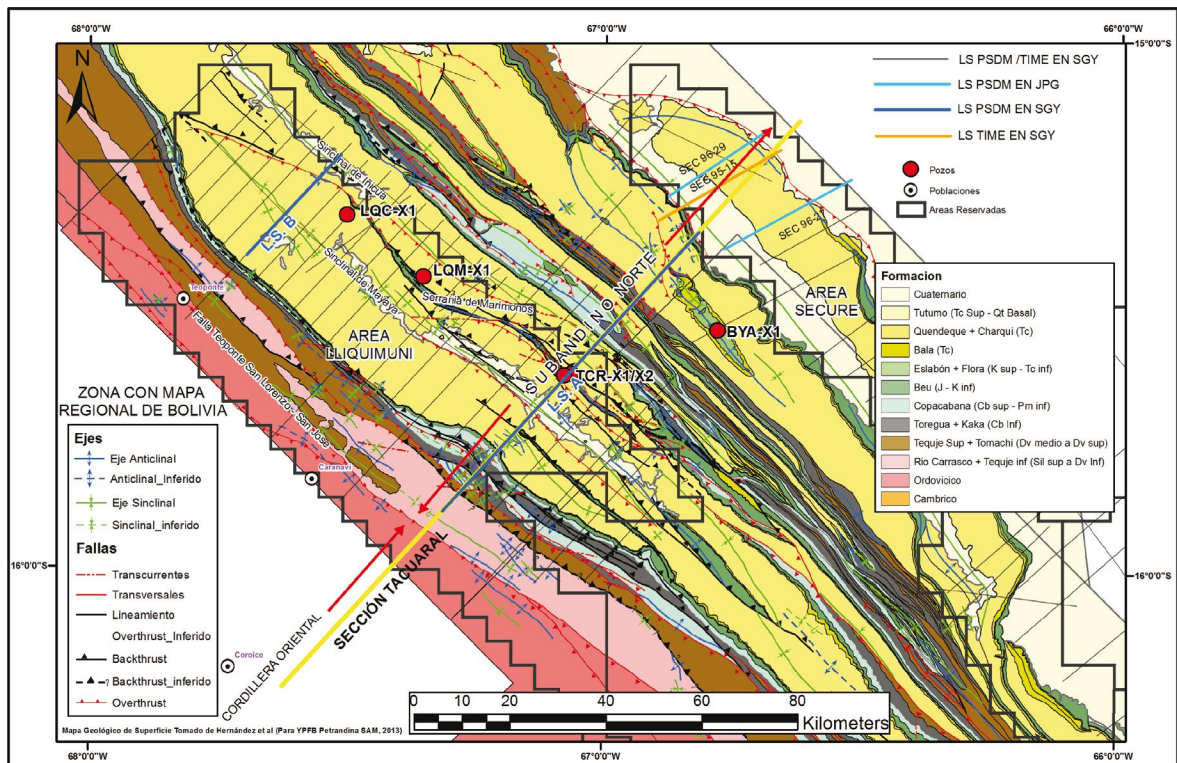


Figura 5. Mapa geológico de superficie con la ubicación de la sección estructural regional Tacuaral, información sísmica, pozos perforados y bloques exploratorios actuales.

al límite CO – Subandino (o interandino), cubriendo transversalmente gran parte de la FFP. En el extremo NE (Secure) se utilizó información sísmica disponible en formato imagen (jpg) y segy (PSDM y TWT).

Un detalle de la estructuración por debajo del Sinclinal de Mayaya y serranía de Marimonos (anticlinales de Lliquimuni-Tacuara) se muestra en la figura 7. Se observa claramente un fondo plano de dicho sinclinal, con una estructuración de reducida longitud de onda por debajo, producto de la respuesta plástica de la Formación Copacabana durante la deformación.

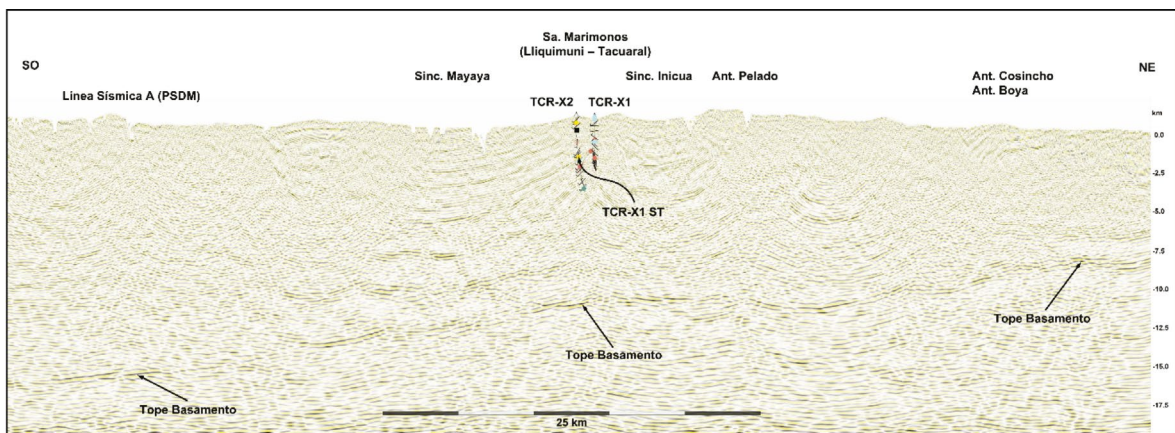


Figura 6. Sección sísmica A, migrada pre-apilamiento a profundidad con los pozos Tacuara, perforados muy cercanos a la traza de la misma (en Fig 5).

Para un mayor entendimiento de los tiempos de deformación que se presuponen en esta interpretación, antes de continuar con el modelo estructural, es conveniente mencionar algunos resultados obtenidos mediante el análisis de trazas de fisión en apatitas y circones, que soportan en buena medida la hipótesis cinemática considerada.

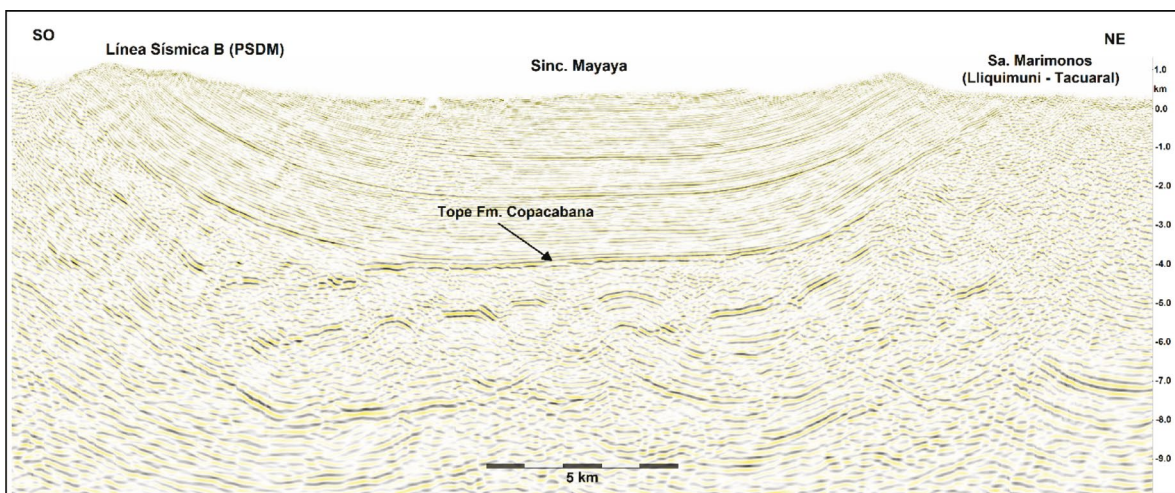


Figura 7. Línea sísmica B (PSDM) donde se observan una serie de dúplex por debajo del sinclinal de Mayaya (Fig 5).

Del total de muestras analizadas, en la figura 8 se muestran cuatro de ellas ubicadas en el sector centro – Occidental del Subandino Norte. Se considera especialmente relevante la muestra M3, correspondiente a sedimentos del tope del Silúrico, extraída del límite SO del Subandino - frente de la CO, con una edad determinada de exhumación de ~16 Ma. Por lo tanto, se asume que la edad de inicio de la deformación del Subandino Norte (en el límite con la CO, también llamado Interandino) es más antigua que 16 Ma, edad en la cual sedimentos del tope Silúrico alcanzaron la isoterma de 60° por el levantamiento y denudación en dicha posición, para lo cual se debió producir una erosión de ~ 3,85 km de la cobertura sedimentaria, si se considera un gradiente termal de 15°C/km y 25°C de temperatura de superficie y espesores de sedimentos de Terciario pre-deformación de ~4000 m (referencia sinclinal de Mayaya), 350 m de Jurásico-Cretácico, 800 m de Carbonífero-Permiano y 1100 de Devónico (total ~6250 m). Por lo expresado anteriormente, la muestra M4, con edad de exhumación ~23 Ma (Formación Beu, Jurásico-Cretácico inf.), puede ser considerada como representativa del tiempo de inicio de la FFP del Subandino Norte boliviano en el extremo Suroccidental.

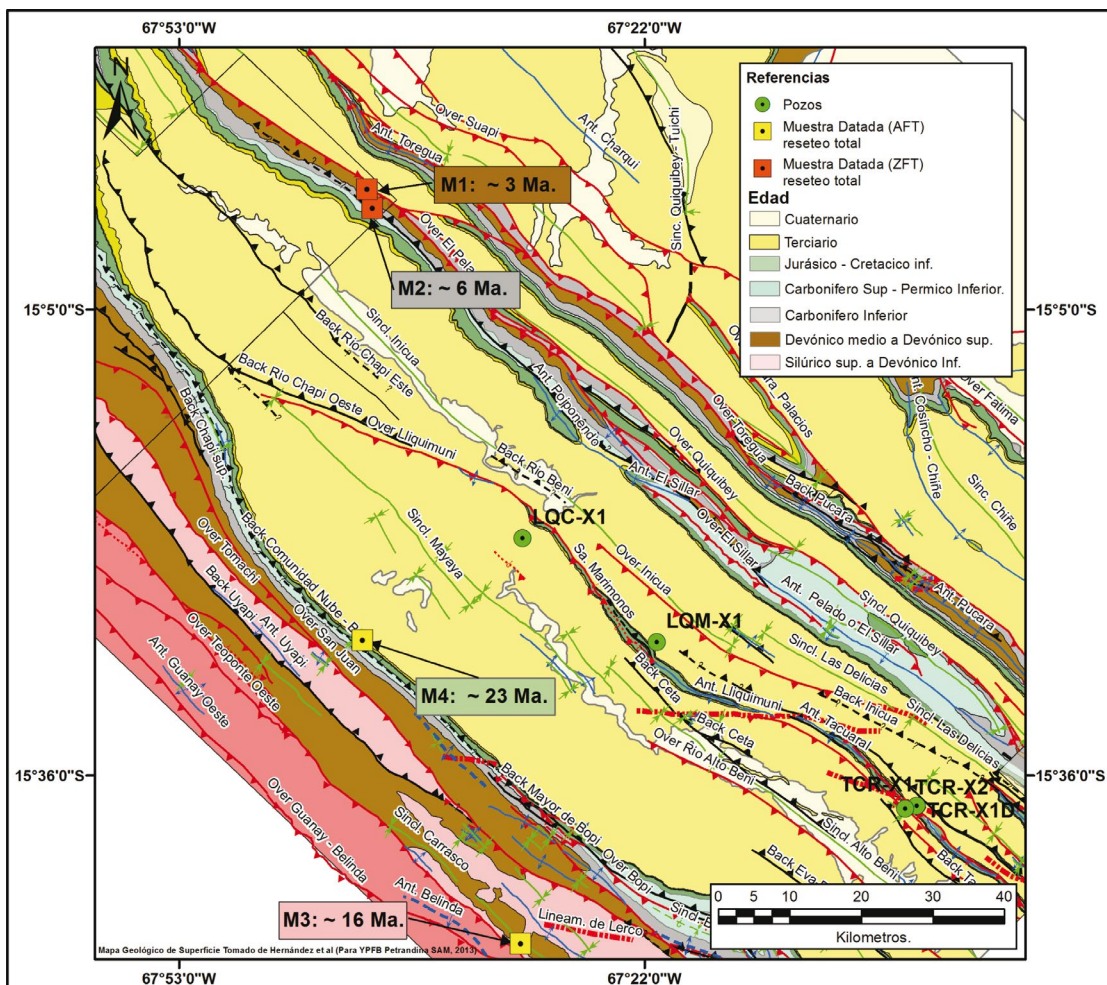


Figura 8. Edades de denudación determinadas por trazas de fisión en apatitas y circones (AFT - ZFT) a partir de muestras con reseteo total.

Sección estructural regional Tacuaral

Algunos autores como Roeder y Chamberlain (1995), Sempere (1995), Dunn et al. (1995), Lamb y Hoke (1997), Baby et al. (1997), McQuarrie (2002) consideran que los niveles de despegue que controlan la deformación se ubican en lutitas del Ordovícico, Devónico, Carbonífero y Pérmico. El despegue principal, según Baby (1995) tiene una pendiente de 4° hacia el SO.

En este trabajo la FFP del Subandino Norte fue interpretada como el resultado de la transmisión de acortamientos hacia el Noreste, por la cobertura sedimentaria, desde dos láminas gruesas que conforman la parte centro-Nororiental de la CO (lámina I y II, Fig. 9). En la CO el despegue intra-basamento, con buzamiento de 1° hacia el SO, se lo ubicó en torno de -26 km (bnm). En cambio, la estimación del ángulo de despegue principal en el Subandino es de $\sim 1,2^\circ$ (promedio) hacia el SO, aunque la medición no es precisa ya que se encuentra plegado por una tectónica actual de basamento.

La longitud total de la sección en estado deformado es de 177 km. Cabe aclarar que en el sector de la CO, el modelo es conceptual por falta de información ya que solamente se dispuso del mapa geológico de Bolivia, por lo cual es una hipótesis de un modelo de deformación simplificado, que explica razonablemente los acortamientos en la faja deformada de piel fina subandina. Primero evolucionó la lámina I, transfiriendo su acortamiento hacia adelante (~ 23 Ma) a través del despegue ubicado en la sección inferior de los sedimentos silúricos. El acortamiento total transmitido se estimó en 37 km, formando la parte centro-Suroriental del Subandino Norte, hasta la proto-estructura somera del anticlinal de Pucará (~ 14 Ma).

La lámina II de la CO está limitada por el despegue profundo dentro del basamento Precámbrico y un despegue superior ubicado unos 1100 m debajo del tope del registro sedimentario Ordovícico. En su evolución, entre ~ 14 Ma. y < 2 Ma (corrimiento Eva Eva –Caquiahuaca) plegó, elevó y transportó la estructuración formada por la evolución de lámina I (CO y Subandino). El acortamiento total interpretado es de ~ 38 km, absorbido en la deformación final del anticlinal Pucará, Cosincho/Boya + Fátima y el corrimiento frontal de Eva Eva. Hacia Eva Eva se pone de manifiesto el acuñaamiento de toda la columna sedimentaria del Paleozoico por onlap sobre el basamento y erosión de la parte superior por la discordancia pre-Jurásica (pre- Formación Beu). El corrimiento de Eva Eva, desarrollado por propagación de falla, incluye en su colgante la base de los sedimentos del Devónico. Esta situación de pinchout total del prisma sedimentario que contiene las rocas con propiedades aptas para el desarrollo de despegues, sugiere que esta faja plegada de piel fina no continuará su evolución hacia el NE. Según el dato sísmico, en la actualidad se está desarrollando una tectónica compresiva de basamento, principalmente por inversión de antiguas fallas distensivas (adjudicadas al rift Ordovícico). Este evento está generando un nuevo plegamiento de toda la FFP suprayacente, congelando la continuidad de su acortamiento.

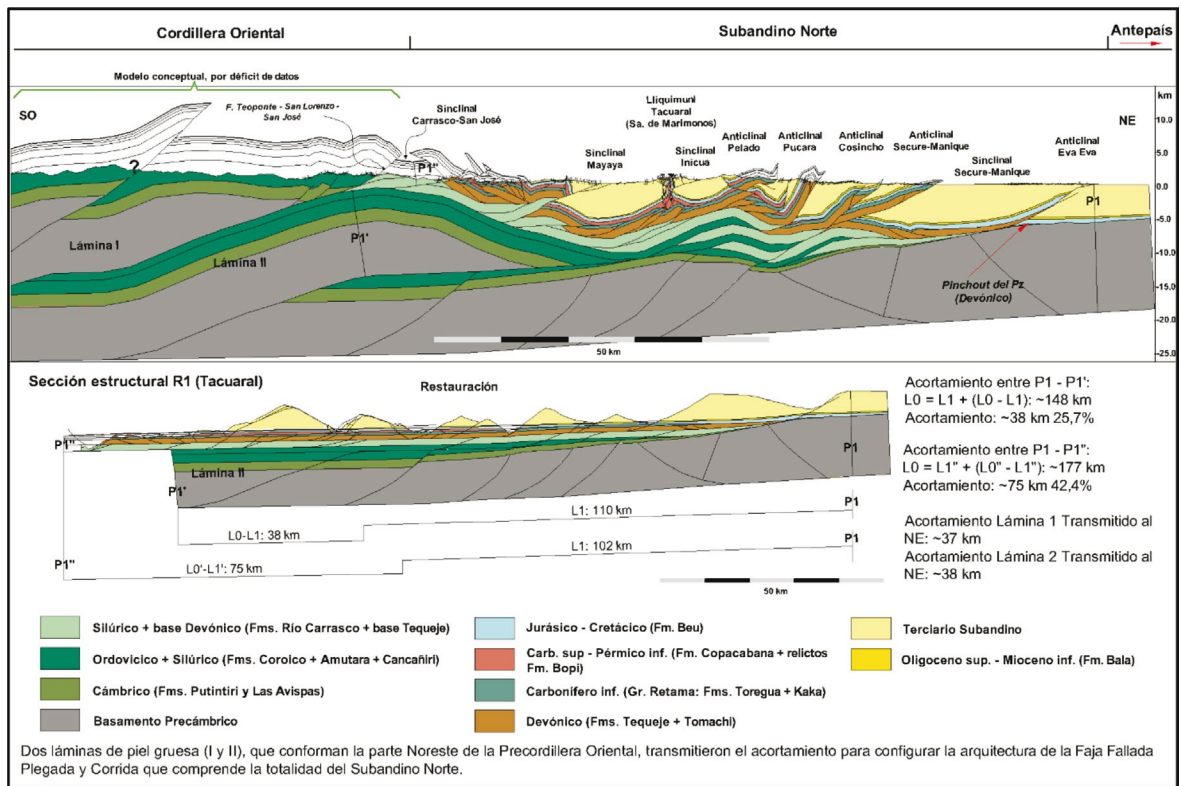


Figura 9. Sección estructural regional Tacuaral con la restauración y acortamientos estimados, incluyendo un modelo conceptual de deformación general en la parte centro-nororiental de la Cordillera Oriental. Se indican los pin lines utilizados como límites en la restauración, los acortamientos parciales y totales de la FFP del Subandino Norte de Bolivia (ubicación en Fig 5).

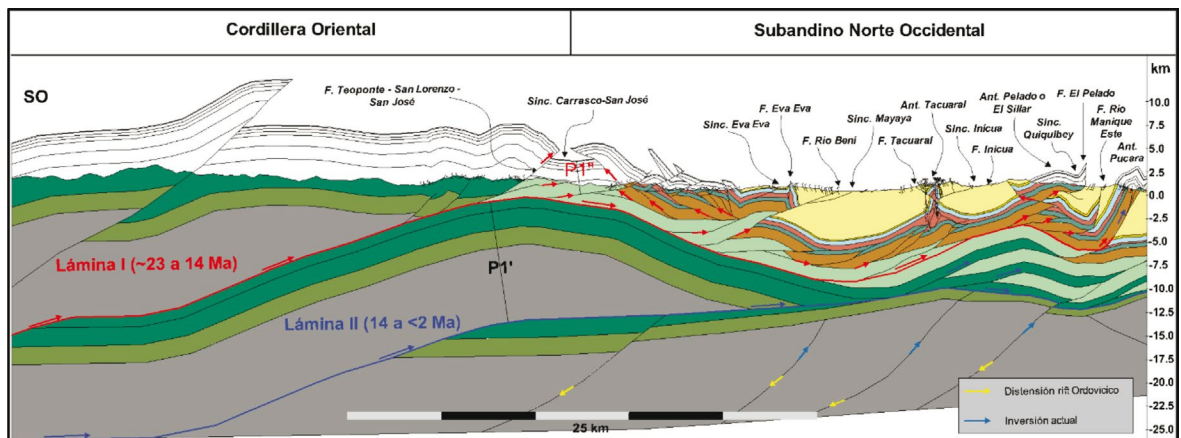


Figura 10. Ampliación occidental de la sección estructural con la síntesis de la evolución cinemática relativa (en rojo transmisiones de acortamientos de Lámina I y en violeta de la Lámina II).

El lineamiento de fallas Teoponte – San Lorenzo – San José (Figuras 2 y 5), tomado como límite NE de la CO, fue considerado un corrimiento fuera de secuencia, desarrollado con posterioridad a toda la transmisión de acortamiento por el mecanismo de flexión de falla de la lámina I. Se muestra muy claramente la estructuración debajo del sinclinal de Mayaya, desarrollada por duplex contenidos entre los desgueses ubicados en la sección basal del Silúrico o Devónico (formaciones

Carrasco o Tequeje) y la Formación Copacabana, la cual por su plasticidad desarrolló un piso estructural propio y disarmónico; este comportamiento no se observó que sea regional, sino localizado en la zona del área Lliquimuni, donde la unidad parece tener los mayores espesores totales y netos de lutitas.

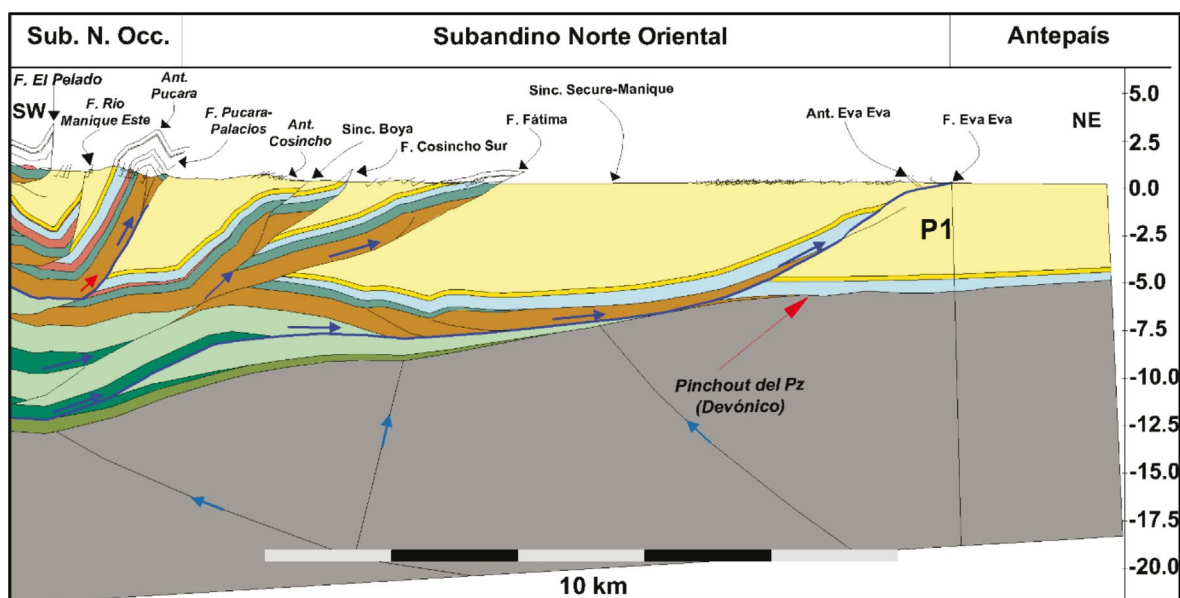


Figura 11. Ampliación Oriental de la sección estructural con la síntesis de la evolución cinemática relativa (rojo: fin de acortamientos transmitidos por la lámina I (proto-estructura Pucara, falla Pucara – Palacios). Violeta: transmisiones de la lámina II).

La porción comprendida entre aproximadamente el sinclinal de Mayaya o la falla Río Beni y el sinclinal de Carrasco – San José es la denominada históricamente como “Interandino”. Como se mencionó anteriormente, en esta visión se lo considera la porción SW de la FFP del Subandino, plegada, elevada y transportada por la lámina II (Fig 10).

Con soporte de edades determinadas por dataciones absolutas en sedimentos de edad terciaria, edades de denudación adjudicadas a la evolución de las estructuras (AFT - ZFT) y magnetoestratigrafía (Hernández et al. 2011 y 2013), se propone el inicio de la deformación del Subandino Norte, por la transmisión de acortamiento de la lámina I, en ~23 Ma en el sector SO, tomando como referencia la información de las muestras M3 y M4 (Fig 8), sector que luego fue replegado, elevado y transportado por el desarrollo de la lámina II. El acortamiento del Subandino asociado a la transmisión a partir de la evolución de la lámina I (38 km, Figuras 9 y 10) se propone que sucedió entre ~23 a ~14 Ma, a razón promedio de 4,22 mm/año, asumiendo que el hiatus entre 14 y 11 Ma corresponde a la primera etapa de desarrollo de la lámina II, la cual plegó, elevó y transportó pasivamente la estructura previa (Figuras 9,10 y 11). Con este criterio de análisis, las estructuras formadas en el “sinclinorio” de Lliquimuni (sinclinales de Mayaya, Inicua y el lineamiento central de la Sierra de Marimón) hasta el inicio de la estructura de Pucará (Figuras 8, 9 y 10) se desarrolló en secuencia entre ~18 y ~14 Ma. Se asume que en el intervalo 23 a 18 Ma

se formaron las estructuras de lámina delgada que se encuentran entre el sinclinal de Carrasco-San José y el flanco SO del sinclinal de Mayaya. El acortamiento total de la lámina I transmitido hacia el NE por la cobertura sedimentaria fue estimado en 37 km y se desarrolló entre 14 a < 2 Ma, a un promedio de 3.1 mm/año. En síntesis, el acortamiento total interpretado para el Subandino Norte de Bolivia, incluyendo el llamado “interandino”, es de 75 km.

La incipiente estructuración por inversión de fallas profundas, se asume que se inició hace menos de 1 Ma.

La interpretación del modelo de deformación presentado, desde la CO hasta el Piedemonte, fue realizada considerando un total de seis (6) superficies de despegue, con jerarquías variables. Teniendo en cuenta el estilo de deformación, se proponen cuatro pisos estructurales, los cuales no están presentes en toda la extensión de la sección estructural (Fig 12).

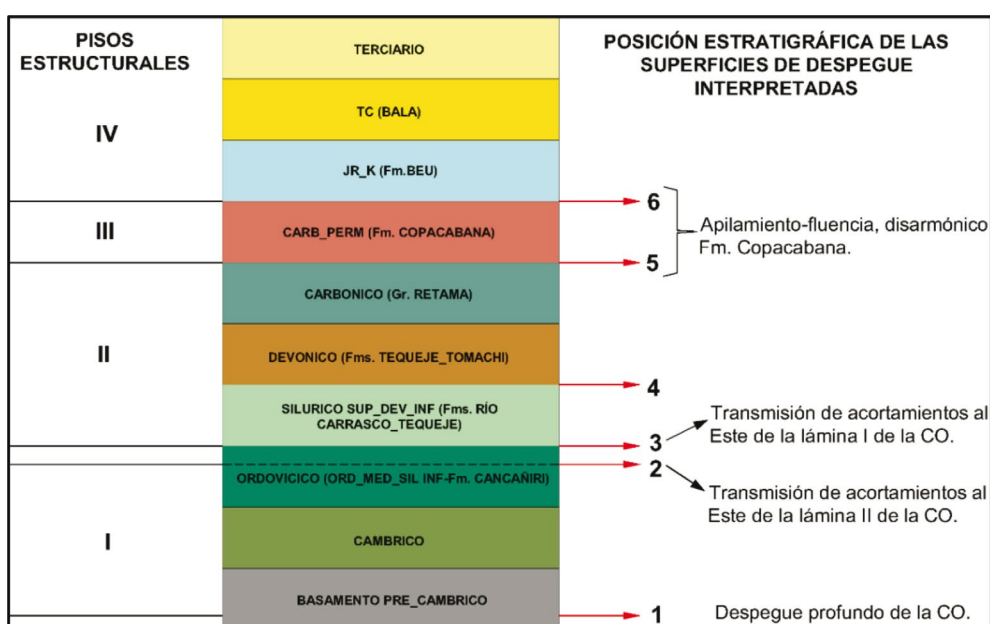


Figura 12. Columna estratigráfica sintética, utilizada en la interpretación estructural. Se indican los despegues interpretados y una hipótesis de subdivisión en pisos estructurales del prisma sedimentario deformado.

Piso estructural I: El mismo tiene su desarrollo en las láminas de la Cordillera Oriental (CO). Se encuentra comprendido entre el despegue profundo intra-basamento (1) y el despegue 3 o límite b (base del Silúrico en el caso de la lámina 1 y despegue superior 2 (límite a) para la lámina 2 de la CO. Piso estructural II: Comprende entre los despegues 2 (límite a) y 5, ubicado en la sección basal del Carbonífero sup.-Pérmico inf. (Formación Copacabana). Los mecanismos dominantes de deformación son: flexión y propagación de falla, presencia de fallamiento mucho más moderno y fuera de secuencia. En este piso se incluyeron los corrimientos de lámina gruesa con despegue intra-basamento Precámbrico. Piso estructural III: Incluye la Formación Copacabana en aquellas regiones en las cuales su respuesta a la deformación es plástica, generando una importante disarmonía entre

la estructura subyacente y suprayacente. Esta interpretación surge claramente de la información sísmica, especialmente en el Sinclinal de Mayaya (por ejemplo Fig 5), por lo cual se asume que en esas zonas se preservaron y/o depositaron importantes espesores pelíticos. Se interpretó que esta deformación plástica, básicamente está controlada por dos despegues (5 y 6). Estos sedimentos habrían respondido con gran plasticidad durante la deformación compresiva, facilitando la transmisión de acortamientos de estructuras más profundas, fluencia plástica y propagación de fallas. La mayor parte de la estructura se habría formado en secuencia hacia el antepaís, aunque en el Oeste se interpretaron bajo corrimientos. Fallas fuera de secuencia son comunes. Piso estructural IV: involucra los sedimentos desde la base de la Formación Beu (Jurásico-Cretácico) hasta actuales. Los principales mecanismos de deformación interpretados son propagación de fallas en secuencia y fuera de secuencia, tanto fore thrusts como también back thrusts.

Cabe destacar que no se diferencian estos pisos estructurales en toda la región del Subandino. Se los define claramente en el área Lliquimuni, más precisamente en el ámbito del sinclinal de Mayaya. Por esta razón, hay extensas zonas en las cuales la estructura profunda y somera es bastante armónica, incluso hay extensas áreas en las cuales no se encuentra depositada o preservada la Formación Copacabana. De todos modos, se sugiere mantener esta subdivisión en pisos estructurales para todo el Subandino Norte.

SISTEMAS PETROLEROS

Rocas madre

En el Subandino Norte se pueden identificar varios niveles con potencial suficiente para ser considerado como posible roca madre. Sin embargo, la cantidad de información disponible actualmente no permite caracterizar completamente esas rocas madre. Los datos de pozos son escasos y hay que complementarlos con la información recolectada en los afloramientos. La Tabla 2 y la figura 13 presentan una síntesis de los datos que han sido compilados a la fecha.

	Flora	Copacabana	Tarma	Retama	Tomachi	Tequeje	Rio Carrasco
Sitios	2	6	3	5	15	13	3
Datos	6	199	140	16	73	244	9
COT (%)	0,81	1,16	1,44	0,83	0,84	0,65	0,66
IH (mg HC/g COT)	225	274	223	65	166	151	67
IO (mg CO ₂ /g COT)	21	31	36	37	35	49	93
Tmax (°C)	436	437	442	437	450	455	477
Ro (%)	0,48	0,68	0,68	0,62	0,78	0,93	1,32
COT° (%)	0,81	1,83	1,27	0,83	0,85	0,72	0,78
IH° (mg HC/g COT)	228	320	236	67	172	213	253

Tabla 2. Síntesis de los datos geoquímicos de roca para el Subandino Norte. Los valores son promedios de datos de pozos y datos de afloramientos.

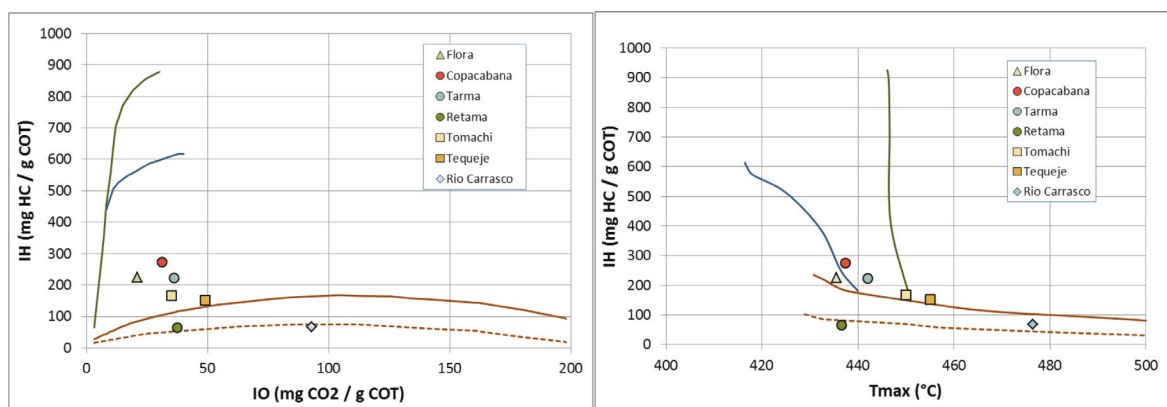


Figura 13. Caracterización geoquímica de las rocas madre potenciales del Subandino Norte.

La Formación Flora del Cretácico superior tiene un cierto potencial como roca madre; sin embargo, los niveles de madurez medidos y calculados permiten descartar esa formación del sistema petrolífero del Subandino Norte.

La Formación Copacabana contiene intercalaciones pelíticas ricas en materia orgánica. Los extractos obtenidos de muestras de roca de la Formación Copacabana en la serranía El Pelado y los pozos Lliquimuni-X1 y Tacuaral-X1, localizados en la serranía de Marimonos contienen azufre en concentraciones que oscilan entre 1.0 y 2.0% (Zubieta-Rossetti, 2008).

Los datos de la Formación Retama indican que esta formación del Carbonífero inferior tiene muy poco potencial como roca madre.

Las formaciones del Devónico presentan valores de COT y de IH muy similares a aquellos que se registran en el Subandino Sur (Schneider et al., este congreso). Hay que notar que la Formación Tomachi (Frasniano) y en particular su parte inferior, es una roca madre excelente en la porción boliviana de la cuenca de Madre de Dios (Schneider et al., en prensa).

La poca información disponible para la Formación Carrasco (Silúrico) muestra altos niveles de madurez. Sin embargo, los valores restaurados indican un potencial del mismo orden que en el Devónico.

Relación Fluido – Roca Madre

La concentración de azufre (entre 0.1 y 0.2 %) en petróleos de manaderos y pozos es pequeña (Zubieta-Rossetti, 2008), lo cual descartaría cualquier relación entre estos hidrocarburos y la roca madre pérmica y carbonífera superior (Formación Copacabana).

En el sector septentrional del Subandino Norte, los cromatogramas y biomarcadores de extractos de petróleo obtenidos de muestras de la Formación Tequeje en el Rio Enatagua y de manaderos de petróleo en el Rio Flora y Rio Yanamayu, muestran que son comparables y probablemente tienen un origen común. La relación de otros elementos traza sugiere que el

petróleo se generó de rocas maduras, con una reflectancia de vitrinita equivalente a 0.8 y 0.9 % (Westport, 2000).

Calibración térmica

El gradiente térmico promedio del Subandino Norte, determinado a partir de los datos de pozos, es alrededor de 15°C/km. Los datos de temperatura se calibran con un flujo térmico actual, 20 km por debajo de la base de sedimentos silúricos, alrededor de 14 mW/m² o sea cerca de 19 mW/m² en la base de los sedimentos. Esos valores son muy parecidos a aquellos medidos y determinados para el Subandino Sur (Schneider et al, este congreso).

Regionalmente, utilizando un flujo de calor constante que permita calibrar los datos de temperatura, no se logran calibrar los datos de madurez disponibles. Para la calibración de estos datos, así como de alguna información de huellas de fisión en zircones, se necesita tomar en cuenta un evento termal al final del Triásico (Schneider et al, in press).

Expulsión

Se realizaron una serie de modelados geoquímicos 1D para evaluar el potencial petrolífero y en particular las áreas de expulsión del Subandino Norte. Los resultados están sintetizados en la

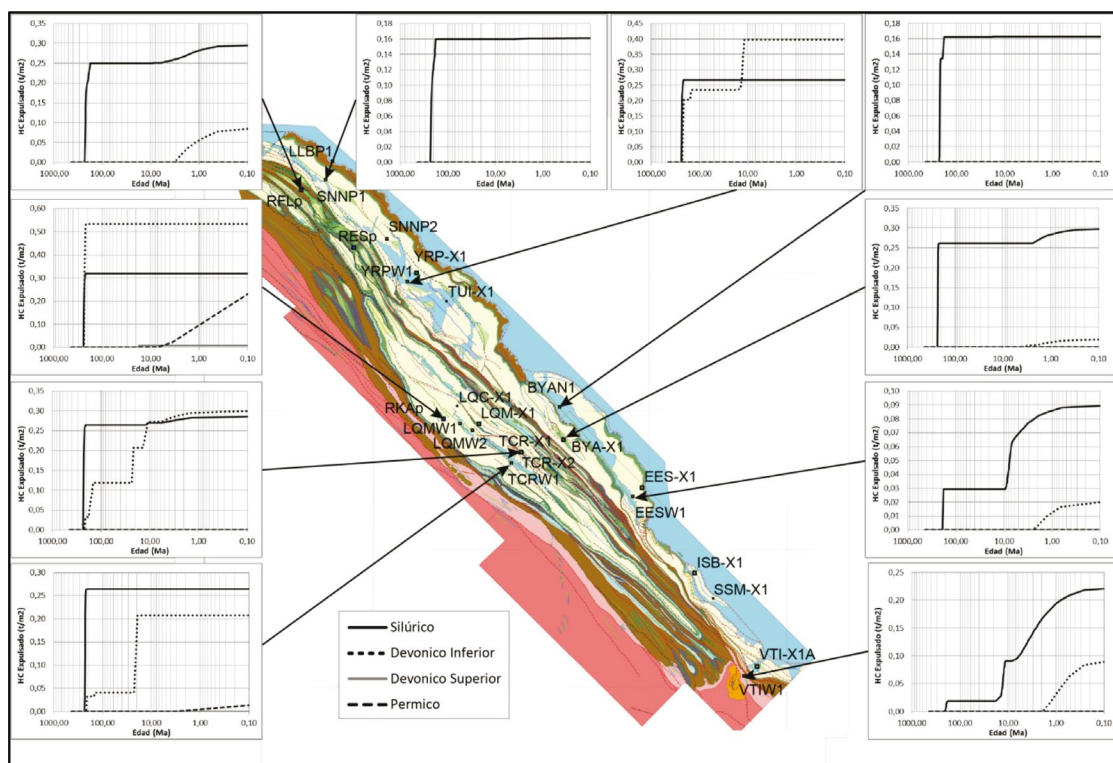


Figura 14. Resumen de los resultados de expulsión para el Subandino Norte.

figura 14.

En las simulaciones se calcula, en el sector Norte, que el Silúrico expulsa al final del Triásico. En la serranía Caquiahua y al Oeste de la falla de Enatagua, el Silúrico y el Devónico inferior presentan una expulsión reciente que empezó hace algunos millones de años y está activa actualmente. Esta expulsión reciente es debido a la descompresión como resultado del levantamiento (uplift) durante la deformación andina. Esto explicaría la cantidad de manaderos ubicados en este sector.

Más al Sureste, en el sinclinal de Tuichi, cerca del pozo YRP-X1, se calculó una expulsión triásica para el Silúrico y el Devónico inferior. El Devónico inferior expulsa nuevamente por compactación durante la formación del sinclinal en la fase de deformación andina.

En la parte central-oriental del Subandino Norte, el Silúrico tiene una fase de expulsión al final del Triásico. Además, el Silúrico y el Devónico inferior presentan una fase de expulsión reciente por descompresión en los sectores adonde el uplift andino fue suficiente como en las serranías de Palacios y El Pelado, explicando la cantidad de manaderos presentes en este sector.

En la parte central-occidental del Subandino Norte, el Silúrico y el Devónico inferior presentan una expulsión Triásica. En el Sinclinal de Mayaya, las formaciones. Tequeje, Tomachi y Copacabana tienen una fase de expulsión reciente relacionada con los depósitos del Terciario que generaron una sobrecarga mecánica (compactación) y una elevación de la madurez. En la serranía de Marimonos también se calculó una expulsión por descompresión del Silúrico y del Devónico inferior que explica los manaderos sobre esta serranía.

Hacia el Sur, en la posición del sinclinal de Secure-Manique, asumiendo que el Silúrico y el Devónico inferior estén presentes en el eje del sinclinal, se modeló una expulsión triásica del Silúrico y una expulsión reciente del Silúrico y del Devónico inferior por aumento de madurez y compactación. Esta última fase de expulsión explica la acumulación no comercial encontrada en el pozo EES-X1.

Al Sur del Subandino Norte, en la zona de Villa Tunari, se calcula una expulsión triásica del Silúrico y una expulsión reciente por aumento de madurez y compactación mecánica del Silúrico y del Devónico inferior por debajo de la falla principal. Esta fase de expulsión localizada por debajo del Ordovícico fallado permite explicar la presencia de hidrocarburos en el pozo VTI-X1A.

SECTOR DE MAYOR INTERES EXPLORATORIO

Con el conocimiento actual, la zona con mayor interés exploratorio del Subandino Norte boliviano se encuentra en el sector centro-Sudoccidental del tercio medio de esta FFP. Se circunscribe aproximadamente al área incluida en el bloque exploratorio Lliquimuni y al lineamiento estructural que incluye los anticlinales superficiales de Pelado y El Sillar. Hacia el NE, SE y NO las expectativas disminuyen.

CONCLUSIONES

La FFP del Subandino Norte de Bolivia es el resultado de la transmisión de acortamientos de dos láminas de piel gruesa que conforman la parte centro-nororiental de la Cordillera Oriental, totalizando aproximadamente 75 km de acortamiento.

Una tectónica de basamento actual está plegando la cobertura previamente deformada del Subandino. La misma es producto de inversiones de fallas distensivas antiguas y probablemente esté generando otras nuevas fallas.

Se propone que la evolución del Subandino Norte de Bolivia sucedió entre 23 y < 2 Ma.

Los pozos perforados en el área Lliquimuni no lograron interceptar una estructura cerrada demostrable en la cual se encuentren los reservorios objetivo o no llegaron a perforarlos (por ej. LQM-X1, LQC-X1, TCR-X1 y X1D). Por lo tanto, con ninguno de ellos se logró realizar una exploración conclusiva.

En el área Lliquimuni, las estructuras objeto de esta investigación, se desarrollan dentro del piso estructural II, con despegue inferior asumido en la sección basal de los sedimentos Silúricos y superior en la base de la Formación Copacabana, la cual respondió plásticamente durante la deformación, generando una fuerte disarmonía entre la estructuración infra y suprayacente.

Desde el lineamiento del Pelado hasta el extremo Nororiental del Subandino Norte, las principales trampas estructurales se ubicarían en estructuras profundas, formadas por flexión de falla entre el despegue superior del Ordovícico y la base del Devónico, lo cual implicaría un importante riesgo exploratorio.

En el sector centro y Oeste, los reservorios que constituyen los objetivos principales a investigar se alojan en el Carbonífero inferior (Grupo Retama) y Devónico superior (Formación Tomachi) y, aunque con mayor riesgo de llenado, en el tope del Silúrico. En el sector externo, los reservorios de mayor relevancia se encuentran entre el Jurásico-Cretácico (Formación Beu) y el Terciario (formaciones Eslabón y Bala).

Se identificaron dos fases de expulsión. La primera, al final del Triásico o principio del Jurásico que ocurrió como consecuencia de un evento termal regional. Esos fluidos pueden haber desaparecido o estar alojados en trampas antiguas, estructurales o estratigráficas, que no han sido descubiertas a la fecha. La segunda expulsión está relacionada con la fase tectónica andina y es provocada por: (1) aumento de madurez y compactación mecánica en algunos sinclinales o por debajo de cabalgamientos o (2) por descompresión en los colgantes de las fallas. Este último mecanismo permite explicar gran parte de los manaderos que se observan en el Subandino Norte. El primer mecanismo permite explicar satisfactoriamente las acumulaciones no comerciales que se encontraron en los pozos VTI-X1 y EES-X1. Estas conclusiones son más que todo cualitativas por falta de precisión de los datos. En particular, no se conoce muy bien la distribución vertical y espacial de los niveles aptos como rocas madre y tampoco los parámetros cinéticos de los kerógenos.

Se debe profundizar la adquisición de datos cuantitativos para ajustar los tiempos de deformación, realizar estudios detallados de las rocas madre consideradas y los parámetros cinéticos de los kerógenos, con el fin de lograr un detallado conocimiento de los sistemas petroleros y la sincronización generación-expulsión-migración-trampas, para así optimizar la exploración conclusiva con pozos y determinar si el Subandino Norte boliviano tiene interés hidrocarburífero económico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) por autorizar esta publicación, a las autoridades de este congreso, la colaboración, aportes y/o críticas constructivas realizados por los colegas Raul E. Giraudo, Jean-Luc Faure, Alejandra Dalenz Farjat y Luis Álvarez.

REFERENCIAS CITADAS

- Baby, P., I. Moretti, B. Guillier, R. Limachi, E. Men-
dez, J. Oller y M. Specht, 1995, "Petroleum
system of the northern and central Bolivian
Sub-Andean Zone". In: Tankard AJ, Suárez
Soruco, R., Welsink, H. J., Petroleum basins
of South America: AAPG Memoir 62, p. 445-
458.
- Baby, P., P. Rochat, G. Mascle y G. Hérail, 1997, "Neo-
gene shortening contribution to crustal thicken-
ing in the back-arc of the Central Andes", *Geol-
ogy* 25, p. 883-886.
- BEICIP-Regional (2015 c), 2015, "Interpretación re-
gional estructural – Cortes regional BN_CC (Bo-
livia Norte Centro Crossline). Oportunidades
Exploratorias", disponible en el CNIH, YPFB
Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, informe inédito,
122 p.
- BEICIP-Regional (2016 e), 2016, "Estudio region-
al Subandino Norte, secciones estructurales
Chepite y Chispani", disponible en el CNIH,
YPFB Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, Informe
inédito, 21 p.
- BEICIP-Regional (2016 g), 2016, "Regional study
across the Subandino Norte and the Madre de
Dios Basin", disponible en el CNIH, YPFB Santa
Cruz de la Sierra, Bolivia, informe inédito, 11 p.
- BEICIP-Regional (2016 h), 2016, "Sección Estruc-
tural Regional Villa Tunari. Identificación de
Oportunidades Exploratorias (Bolivia Norte)",
disponible en el CNIH, YPFB Santa Cruz de la
Sierra, Bolivia, informe inédito, 11 p.
- BEICIP-Regional (2017 b), 2017, "Estudio Regional
del Subandino Norte, Versión 1", disponible en
el CNIH, YPFB Santa Cruz de la Sierra, Bolivia,
informe inédito, 59 p.
- BEICIP-Proyecto (2017 u), 2017, "Área Lliquimuni (LQC-
X1) Interpretación estructural, sistemas petrolíferos y
propuesta geológica de perforación del pozo Mayaya
Centro (MYC-X1)", disponible en el CNIH, YPFB
Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, informe inédito, 66 p.
- Benedetto, J.L., 2012, "El Continente de Gondwana
a través del Tiempo. Una introducción a la Ge-
ología Histórica". Academia Nacional de Cien-
cias, Córdoba, Argentina. 384 p.

- Dunn, J.F., K.G. Hartshorn y P.W. Hartshorn, 1995, "Structural styles and hydrocarbon potential of the Subandean thrust belt of Southern Bolivia", en: Tankard, A.J., Suarez Soruco, R., Welsink, H.J. (Eds.), *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoir 62, p. 523-543.
- Hernández, R., A. Dalenz Farjat, L. Álvarez, F. Aramayo Flores, M. Dellmans, J. Hernández, A. Álvarez, A. Graboski, M. Cantoya y D. González, 2011, "Levantamiento de Geología de Superficie, Muestreo Geoquímico y Análisis Sedimentológico del Bloque Lliquimuni". XR S.R.L. para YPFB Petroandina S.A.M, informe inédito disponible en CNIH (YPFB, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia).
- Hernández, R., A. Dalenz Farjat, L. Álvarez, F. Aramayo Flores, M. Dellmans, E. Cristallini, J. Hernández, A. Álvarez, M. De Giusto, M. Costilla, B. Pozo, R. Duarte, C. Odstricil, D. González y A. Graboski, 2013, "Proyecto Levantamiento Geológico de Superficie, Subandino Norte de Bolivia, Informe Final Areas Chepite, Madidi, Chispani y Secure" (Tomos 1, 2 y 3). XR S.R.L. para YPFB Petroandina S.A.M, informe inédito disponible en CNIH (YPFB, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia).
- Lamb, S., L. Hoke, 1997, "Origin of the high plateau in the Central Andes, Bolivia, South America". *Tectonics* 16(4), p. 623-649.
- McQuarrie, N., 2002, "The kinematic history of the central Andean fold-thrust belt, Bolivia: Implications for building a high plateau". *Geological Society of America Bulletin*, v. 114, p. 950-963.
- McQuarrie, N., J.B. Barnes y Ehlers, T.A., 2008, "Geometric, kinematic and erosional history of the central Andean Plateau". *Tectonophysics* 399, p. 15-37.
- Roeder, D. y R.L. Chamberlain, 1995, "Structural Geology of Sub-Andean Fold and Thrust Belt in Northwestern Bolivia", en Tankard, A.J., Suárez Soruco, R., Welsink, H.J., *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoir 62, p. 459-479.
- Schneider F., L. A. Constantini, R. Mayta, S. Rouse y J. Esquivel, "Contribución a la evaluación del potencial petrolífero del subandino sur de Bolivia". X Congreso de Exploración y Desarrollo – CON-EXPLO, Mendoza (aceptado).
- Schneider F., S. Rouse, G. Gutierrez, J.L. Faure, J. Pareja, A. Lemgruber y O. Padilla, "Hydrocarbon Potential of the Eastern Madre de Dios Basin, Bolivia. Petroleum Basins and Hydrocarbon Potential of the Andes of Peru and Bolivia". AAPG Memoir (en prensa).
- Sempere, T., 1995, "Phanerozoic evolution of Bolivia and adjacent regions", en Tankard, A.J., Suarez Soruco, R. y H.J. Welsink, *Petroleum basins of South America: American Association of Petroleum Geologist*, Memoir 62, p. 207-230.
- Suarez Soruco, R., 2000, "Compendio de Geología de Bolivia", *Revista Técnica de YPFB*, Vol. 18, N° 1-2, 437 p.
- Westport, 2000, *Geology and Geochemistry of outcrop samples Tequeje, Beu, Eslabon, Bala and Quendeque Formations*, La Paz Department, Northwestern Bolivia for Repsol-YPF Bolivia. Unpublished report disponible en el CNIH, YPFB Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Zubieta-Rossetti, D., 2008, *El sistema petrolífero paleozoico del Subandino Norte, Noroeste de Bolivia*. VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Simposio de Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas), Mar de la Plata, Argentina, extended abstract.