

MODELO DE DEFORMACIÓN Y TRAZAS DE FISION EN APATITA EN LA SERRANÍA LA LLUVIOSA, CHAPARE, BOLIVIA.

Adolfo Rosales¹, Jaime Soria Galvarro¹, Roberto M. Hernandez^{2,3}, Ernesto Cristallini³, Luis A. Alvarez², Juan I. Hernandez², Mariano Dellmans², Andrés F. Alvarez², Alejandra Dalenz Farjat², Marcos R. Costilla²

¹ YPFB Chaco S.A. Edificio Centro Empresarial Equipetrol, 6to Piso, Av. San Martin N°1700, Equipetrol Norte, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, ² XR GEOMAP Av. Ricardo Durand 397, Barrio Grand Bourg, 4400 Salta Capital, Argentina, ³ LA TE Andes, Calle Las Moreras, Vaqueros, Salta Capital, Argentina

RESUMEN

El resultado del estudio de Trazas de Fisión en Apatitas (AFT) de muestras devónicas a cretácicas de la Serranía de La Lluviosa (Chapare), evidencia una historia Tiempo-Temperatura miocena caracterizada por procesos de calentamiento-soterramiento y exhumación-enfriamiento sumamente rápidos, demostrada por los reseteos parciales a nulos de las muestras analizadas. Las muestras devónico-carboníferas muestran reseteos parciales en el intervalo Triásico superior-Jurásico medio asociado posiblemente a la generación de depocentros distensivos con aumento de flujo térmico. El reseteo parcial mesozoico de las muestras mencionadas y el nulo reseteo de las muestras Jurásico-Cretácico inferior a Mioceno, lleva a pensar en un sistema térmico con un flujo lo suficientemente bajo con posterioridad al Jurásico medio asociado posiblemente a una posición de alto estructural. La falta de definición en la historia termal miocena sugiere la aplicación del método U-Th-Sm/He en apatitas (40-70 °C/1Ma) en las muestras del Área Isarsama. La base del Mioceno en el área de estudio se determinó por U/Pb SHRIMP en circones en nivel de toba dando 8.62 ± 0.15 Ma, a 320 m de la base de la Formación Yecua, indicando una edad joven, equivalente a los trenes más orientales del Subandino Sur (Serranía de Charagua, Santa Cruz). La estructura compatibilizada entre cuatro cortes, muestra un nivel de despegue inferior a una profundidad que varía entre -9500 m y -8200 m y otro superior en la base de unidades Limoncito-Los Monos y equivalentes. La inserción de una cuña de basamento hacia el sur, en el nivel superior, desarrolla el tren estructural principal de La Lluviosa (despegue con rotación progresiva de limbos o propagación tipo *trishear*). Posteriormente, una serie de fallas iniciadas en el nivel de despegue inferior y con vergencia septentrional, repliegan a la estructura de La Lluviosa y generan estructuras hacia el norte desde las que se nuclean las superficiales de Bulu Bulu - Carrasco y Katari, con posible componente de rumbo. Por último, una serie de corrimientos fuera de secuencia, montan el sinclinal de Ivirizu sobre el de Ichoa (falla de Ivirizu-Sacta) y terminan de darle la configuración actual a la estructura.

Palabras Clave: Trazas de Fisión en Apatita, Modelo de deformación, Sierra La Lluviosa.

INTRODUCCION

El presente trabajo desarrolla una nueva conceptualización estructural del Área Isarsama localizada en las proximidades de la localidad de Entre Ríos, Departamento de Cochabamba (Fig.1). Se debe mencionar que el área de estudio se ubica al norte del denominado Codo de Arica o Santa Cruz ("Boomerang", 18° S), a partir del cual se produce un cambio en la dirección de las estructuras, evidenciando un rumbo noroeste-sudeste (~N45°O) hacia el norte de esta inflexión y estructuras de rumbo aproximado norte-sur al sur del paralelo de referencia mencionado. En particular, el área Isarsama muestra un rumbo generalizado de sus estructuras anticlinales asociadas a fallas con rumbo ONO-ESE con un sentido general de transporte hacia el norte.

En cuanto a la perspectiva exploratoria, la existencia de los yacimientos de hidrocarburos de Bulu Bulu, Carrasco y Katari en el sector nororiental y menos deformado, adyacente a la zona mapeada (Anticlinal La Lluviosa), permiten afirmar la presencia de al menos dos sistemas petroleros conocidos: Limoncito (facies generadora) - Roboré, y Limoncito (facies generadora) - Yantata. Se destacan, además, la Formación Petaca y la "Arenisca Sara" como otras unidades productivas de hidrocarburos en la región.

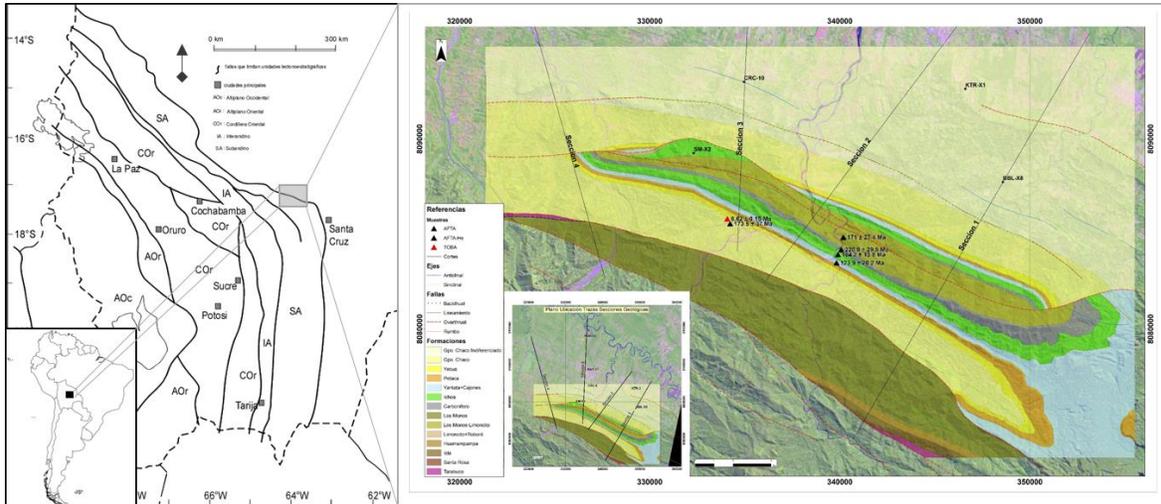


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (Lluviosa, Chapare) a partir de Sempere, 1995 (izquierda). Mapa geológico del Área Isarsama (GEOMAP S.A. 2016, derecha). En líneas negras se muestran los cortes balanceados (Fig. 2). Los triángulos negros indican las muestras datadas por AFT. El triángulo rojo indica la ubicación del nivel tobáceo datado por U/Pb SHRIMP.

La incorporación de datos recientes de geología de superficie obtenidos en el año 2015 para el desarrollo del mapa de la Fig. 1 y su combinación con datos procedentes de subsuelo (pozos y sísmica 2D) permitió la integración tridimensional de 4 secciones estructurales balanceadas y ajustar la geometría de plegamiento resultante y el modelo de deformación. Por otro lado, el desarrollo de dataciones por trazas de fisión en apatitas (AFT) a partir de muestras de superficie en unidades devónicas (Limoncito-Los Monos) a terciarias (Grupo Chaco), y la datación absoluta de un nivel de toba (U/Pb SHRIMP en circones), permitió la caracterización de la evolución termal del sector analizado y la obtención de edades confiables para los depósitos continentales involucrados en el *foreland* subandino desarrollado a partir de los 9-10 Ma (Hernández *et al.*, 2002).

COLUMNA INVOLUCRADA EN LA DEFORMACIÓN

La columna sedimentaria presente en superficie en el área de Isarsama (~6500 m) está compuesta por unidades silúricas (Formación Tarabuco) a mioceno-pliocenas (Grupo Chaco); aunque regionalmente al sur de esta área, las rocas más antiguas corresponden al Ordovícico (Beccar, 1994) y al oeste en el área de Tiraque - El Palmar (Villa Tunari) al Cámbrico (dato sin edad absoluta que lo confirme; Brockman *et al.*, 1972 en XR s.r.l., 2013).

En base a las características mecánico-reológicas de las unidades involucradas en la deformación y la ubicación de los niveles de despegue principales definidos en el presente trabajo (ver más adelante), la columna de roca involucrada en la deformación de alrededor de 9500 metros de espesor, se divide en tres niveles o pisos estructurales (Fig. 2):

Nivel estructural superior (~4500 m): involucra a las unidades carboníferas, mesozoicas y terciarias, las cuales responden a los esfuerzos compresivos de la orogenia andina como un intervalo pasivo, cuya deformación no muestra cambios de espesor (plegamiento paralelo), adaptándose a la morfología adoptada por el nivel estructural intermedio.

Nivel estructural intermedio (~900 m): incluye al intervalo predominantemente pelítico devónico (Pragian a Fameniano inferior) de la Formación Limoncito y equivalentes, el cual responde al campo de esfuerzos compresivos de manera incompetente con una deformación disarmónica y crecimiento vertical. Es responsable del desacople de las estructuras profundas y superficiales, constituyendo su base el nivel de despegue intermedio (ver secciones Fig. 3).

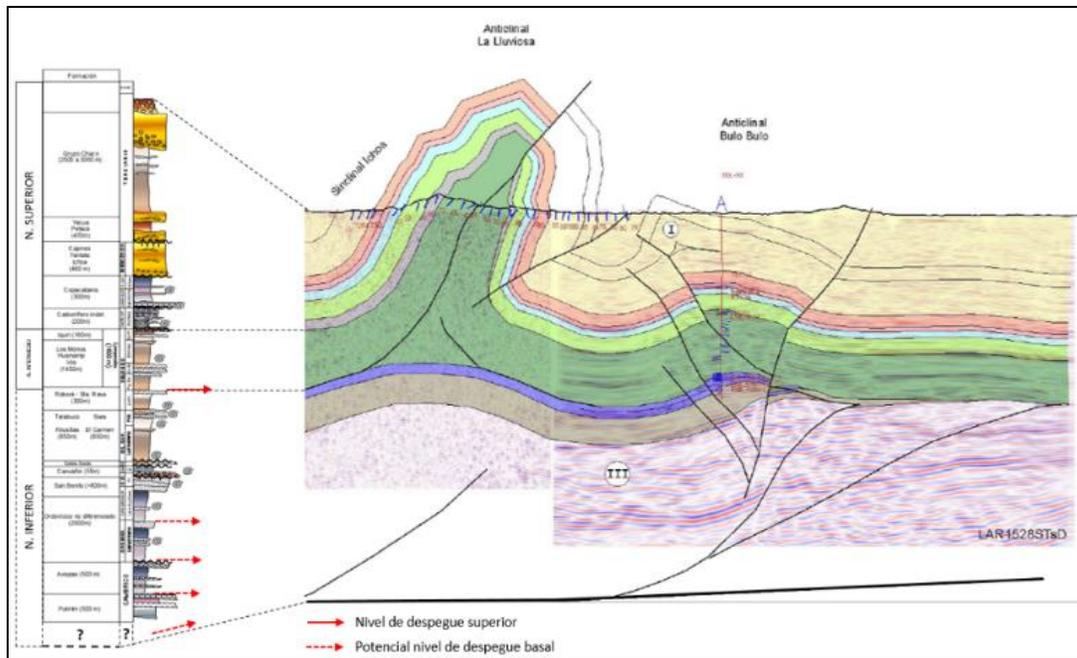


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada. Las flechas rojas indican el nivel de despegue superior (Fm Limoncito) y las posibles posiciones del nivel de despegue basal.

Nivel estructural inferior: constituye un intervalo de comportamiento mecánico frágil con capas rígidas capaces de transmitir esfuerzos a grandes distancias, como son las areniscas predominantes de la Formación Roboré e infrayacentes (formaciones del Silúrico y Ordovícico), respondiendo al esfuerzo compresivo tangencial conservando espesores, plegamiento paralelo y generando estructuras profundas por flexión o propagación de falla. Por debajo, habría un zócalo compuesto por sedimentitas cámbricas y rocas cristalinas y/o metamórficas del Precámbrico.

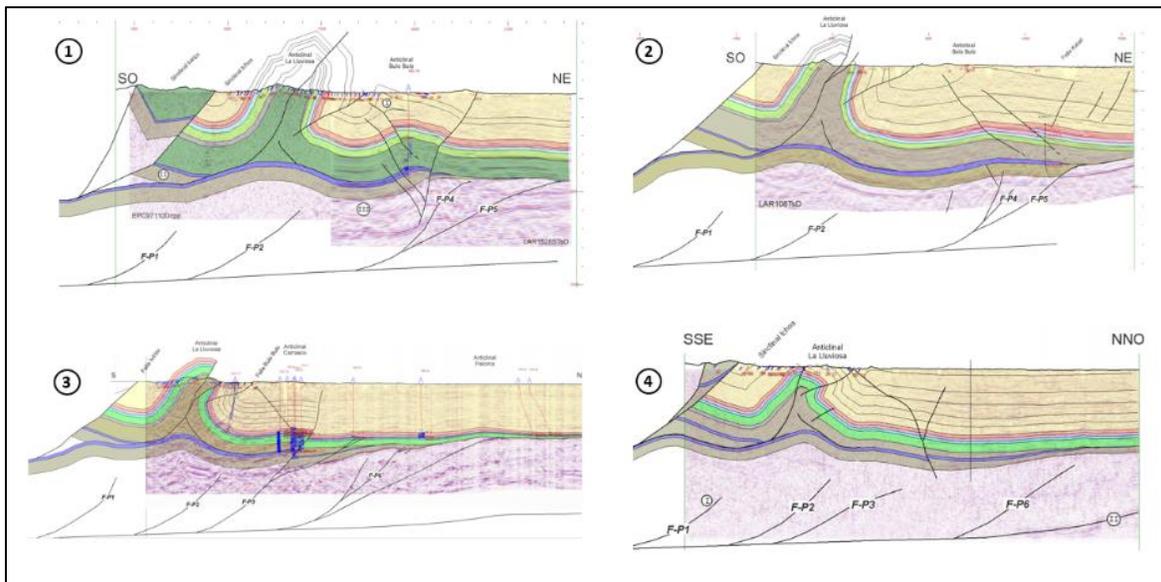


Figura 3. Secciones estructurales balanceadas construidas en el Área Isarsama utilizando el software Andino 3D®. Los números identifican las secciones ubicadas en la Fig. 1.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y MODELO DE DEFORMACIÓN

Se realizaron 4 secciones estructurales balanceadas (Fig. 1 y Fig. 3) empleando datos de superficie y de subsuelo arribando a una reconstrucción coherente entre las mismas. Esta reconstrucción muestra un nivel de despegue basal localizado a -9500 m en el extremo sur de las secciones y -8200 m por debajo de la estructura de La Lluviosa (niveles ordovícicos o más antiguos), y un nivel de despegue superior ubicado en la base del nivel estructural intermedio (base de Fm Limoncito).

Las secciones 1, 2, 3 y 4 fueron integradas tridimensionalmente reflejando compatibilidad en el modelo de deformación, los espesores involucrados y los acortamientos determinados (Fig. 4). En cuanto a este último parámetro es interesante hacer notar la existencia de un gradiente de desplazamientos/acortamiento de noroeste a sureste (hacia el Codo de Santa Cruz) con valores de 3.3 km (13%) en la sección 4 (occidental) a valores de 8.5 km (29%) en la sección 1 (oriental), pasando por valores intermedios de 5.7 km (19%) y 7.3 km (27%), en las secciones 3 y 2, respectivamente.

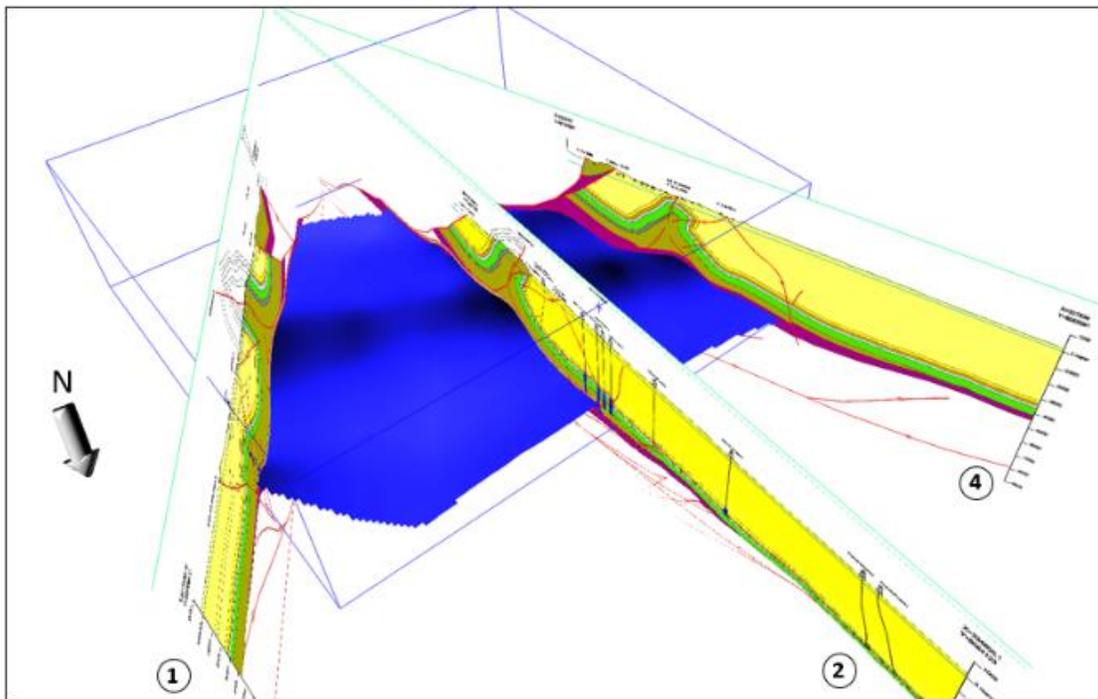


Figura 4. Vista 3D integrada de las secciones 1, 2 y 4 (círculos numerados). En azul la superficie de Roboré. Desarrollado en Andino 3D®.

Las secciones balanceadas evidencian una cronología de conformación de la estructura mostrando la inserción de una cuña de basamento (nivel estructural inferior o infrayacente) desde el sur en el nivel de despegue superior por el cual se transfiere el acortamiento ingresado conformando la estructura de La Lluviosa. La geometría estructural obtenida en la misma conduce a pensar en un mecanismo de despegue combinado modo 3 (Poblet y McClay, 1996) o un pliegue por propagación de falla tipo trishear (Erslev, 1991). La rotación progresiva de limbos en el flanco frontal de la estructura se determinó a partir de la identificación de estratos de crecimiento por datos de dipmeter en el pozo SMG-x1 (San Miguel, Sección 3). Se debe mencionar que ambos mecanismos conducen a variaciones de espesor en el nivel intermedio dúctil-semidúctil de Limoncito-Los Monos. De manera posterior se generan, con vergencia septentrional, una serie de fallas despegando en el nivel inferior, repliegan la estructura de La Lluviosa y generan estructuras hacia el norte desde las que se nuclean las superficiales de Bulu Bulu - Carrasco y Katari (las que podrían tener vinculada una componente

de rumbo importante). Por último, una serie de corrimientos fuera de secuencia, montan el sinclinal de Ivirizu sobre el de Ichoa (falla de Ivirizu-Sacta) y terminan de darle la configuración actual a la estructura.

TERMOCRONOLOGÍA EN LA SERRANÍA LA LLUVIOSA, RESULTADOS DE TRAZAS DE FISIÓN EN APATITAS (AFT)

La necesidad de definir el tiempo de conformación de la estructura de La Lluviosa como trampa prospectable (reservorios Roboré y/o Yantata) en el sector frontal de la faja plegada Subandina motivó el muestreo de superficie y análisis por trazas de fisión en apatitas (AFT) de 5 muestras seleccionadas en base a su posición en la columna estratigráfica (Devónico a Mioceno) y la aptitud mineralógica (ver ubicación en Fig. 1).

Las edades centrales AFT obtenidas para las muestras analizadas revelan, a excepción de la muestra de la Formación Los Monos-Limoncito y la muestra carbonífera, un reseteo nulo no habiéndose alcanzado las temperaturas de reestructuración total de las apatitas por el tiempo necesario para este sistema isotópico ($110^{\circ}\text{C}/10\text{ Ma}$). Las muestras devónico-carboníferas muestran reseteos parciales en el intervalo Triásico superior-Jurásico medio asociado posiblemente a depocentros distensivos con aumento de flujo térmico. El reseteo parcial mesozoico de las muestras mencionadas y el nulo reseteo de las muestras Jurásico-Cretácico inferior a Mioceno, lleva a pensar en un sistema térmico con un flujo lo suficientemente bajo como para no haber reestructurado ninguna muestra con posterioridad al Jurásico medio a pesar de haber sido sometidas a cargas litostáticas superiores a los 3000 m, como es el caso de la muestra devónica, cuya temperatura máxima alcanzada de alrededor de 90°C , coincide con valores de IAT de 2.5 (Ro equivalente 0.5), indicando inmadurez a madurez temprana de hidrocarburos líquidos. Los datos obtenidos por trazas de fisión en apatitas conducen a plantear un escenario posiblemente de alto estructural asociado a una disminución del flujo térmico con posterioridad al Jurásico medio.

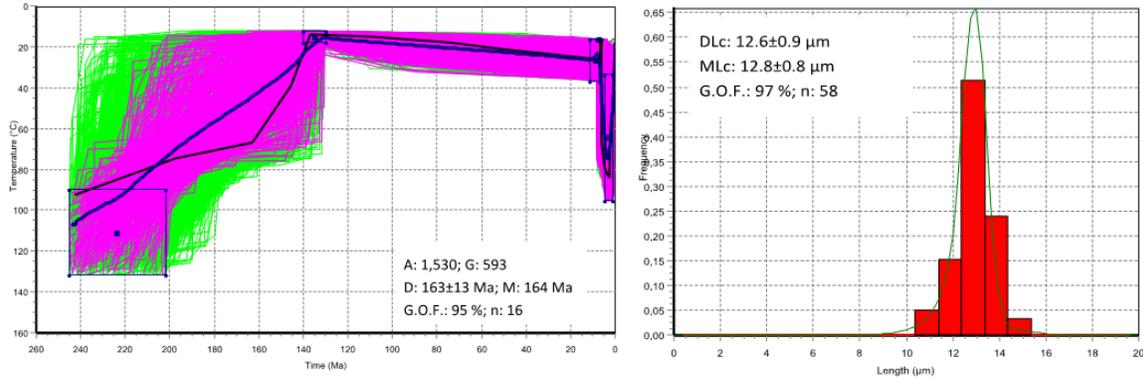


Figura 6. Modelado numérico desarrollado para la muestra de la Formación Ichoa (HeFTy®).

El modelado numérico desarrollado para la muestra de la Formación Ichoa (software HeFTy®, Fig. 6), muestra el escenario previamente descrito con una temperatura de muy leve aumento entre la edad estratigráfica (Jurásico-Cretácico inferior) y los 10 Ma entre 20 y 30° y luego un abrupto calentamiento por aumento de carga litostática a partir de los $\sim 8\text{ Ma}$, dato coherente con la edad obtenida para la base de los depósitos miocenos en esta posición del subandino de $8.62 \pm 0.15\text{ Ma}$ (U/Pb SHRIMP en circones, nivel de toba a 320 m de la base de la Formación Yecua), indicando una edad joven para el Grupo Chaco en esta posición oriental del sistema plegado y corrido, equivalente a los trenes más orientales del Subandino Sur (Serranía. de Charagua). Por último, se observa un rápido enfriamiento de la muestra modelada iniciando alrededor de los $\sim 4\text{ Ma}$, evidenciando posiblemente el crecimiento estructural de La Lluviosa.

CONCLUSIONES

La construcción de 4 secciones balanceadas integradas tridimensionalmente permitió caracterizar la cinemática de la deformación y los posibles mecanismos asociados a la estructura de La Lluviosa. En este sentido se menciona la inserción de una cuña del nivel estructural inferior hacia la base del nivel intermedio formando la estructura mencionada la cual se ve replegada posteriormente por la estructuración profunda. Por último, el desarrollo de corrimientos fuera de secuencia en el sector sur del área de estudio.

Los datos de AFT muestran que el tiempo involucrado en el par calentamiento-enfriamiento mioceno fue sumamente rápido no posibilitando el reseteo total de las muestras analizadas.

Se determina de manera tentativa la edad de crecimiento de la estructura de La Lluviosa alrededor de los 4 Ma. Sin embargo, por la falta de precisión en la trayectoria Tiempo-Temperatura miocena, se recomienda la aplicación del método U-Th-Sm/He en apatitas (40-70°C/1 Ma), lo que conduciría a la determinación precisa de la edad de crecimiento de la estructura anticlinal de La Lluviosa.

REFERENCIAS

- Erslev, E. A. 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19(6), 617-620.
- GEOMAP S.A. 2016. Relevamiento Geológico de Superficie. Áreas Isarsama – San Miguel, Chimoré – Bulo Bulo, Carrasco. Informe Final. Informe Interno YPFB Chaco S.A. 183 pgs.
- Hernández, R.M., Echavarría, L., Allmendinger, R., Reynolds, J., Jordan, T. 2002. La Faja Plegada y Corrida Subandina del Noroeste Argentino. Secuencias Precrecimiento y Crecimiento, Geometría Estructural y Tiempo de Evolución de Los Andes. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata, CDs Trabajos Técnicos.
- Poblet, J. y McClay, K. 1996. Geometry and kinematics of single-layer detachment folds. *AAPG bulletin* 80(7), 1085-1109.
- Sempere, T. 1995. Phanerozoic evolution of Bolivia and adjacent regions. In: A.J. Tankard, R. Suárez Soruco and H.J. Welsink, (Eds.), *Petroleum basins of South America*. The American Association of Petroleum Geologists 62: 207–230.
- XR S.R.L., 2013. Proyecto Levantamiento Geológico de Superficie Subandino Norte de Bolivia. Áreas Chepité, Madidi, Chispani, Secure. Informe Inédito. YPFB-Petroandina S.A.M.