

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO ESTRUCTURAL DE LOS ANTICLINALES CASHIRIARI Y SAN MARTÍN EN LA FAJA PLEGADA Y CORRIDA DE CAMISEA, ANDES CENTRALES, PERÚ

Juan Pedro Doiny Cabré¹ y Lara Azul Fumarola²

1: Pluspetrol S.A. jdoiny@pluspetrol.net

2: Pluspetrol S.A. lfumarola@pluspetrol.net

Palabras clave: Camisea, San Martín, Cashiriari

ABSTRACT

The Camisea fold and thrust belt, located in the southern Ucayali Basin, has been extensively studied due to its important hydrocarbon accumulations. High-quality 3D depth-migrated seismic data allows the identification of five structural trends in a thin-skinned fold and thrust belt. The main structures are north-verging thrusts with a basal detachment that deepens southward. The San Martín and Cashiriari anticlines, which are the focus of this work, are interpreted as fault-bend folds. In order to analyze along-strike variations of these structures, four cross-sections were made. Besides the north-verging thrusts, high angle reverse faults with opposite vergence can be identified. The analysis of the cross-cutting relationships between the different structures allows us to define a sequence of deformation in which the high angle reverse faults precede and are cut by the main north-verging thrusts. A kinematic evolution of the structure is presented in order to verify the correct restoration and validate the structural cross-section interpretation.

INTRODUCCIÓN

La sub-cuenca de Camisea se ubica en la porción sur de la cuenca de Ucayali, departamento de Cuzco, Perú, aproximadamente a unos 400 km al este de la ciudad de Lima (Fig. 1). Se trata de una cuenca de antepaís relacionada a la orogenia Andina, con una columna sedimentaria superior a los 8000 metros que abarca del Paleozoico al Neógeno (Disalvo *et al.* 2003). El área fue ampliamente estudiada desde la década de los 80's debido al descubrimiento de importantes acumulaciones de hidrocarburos. Por esta razón, se cuenta con casi 6000 km de líneas sísmicas 2D y casi unos 2200 km² de sísmica 3D (Lúquez y Disalvo, 2004).

La deformación observada en la zona se corresponde a una faja plegada y corrida de piel fina donde se identifican cinco trenes estructurales – de sur a norte: Timpia, Armihuari, Cashiriari, San Martín y Fitzcarraldo. Estos trenes estructurales se relacionan a corrimientos imbricados y

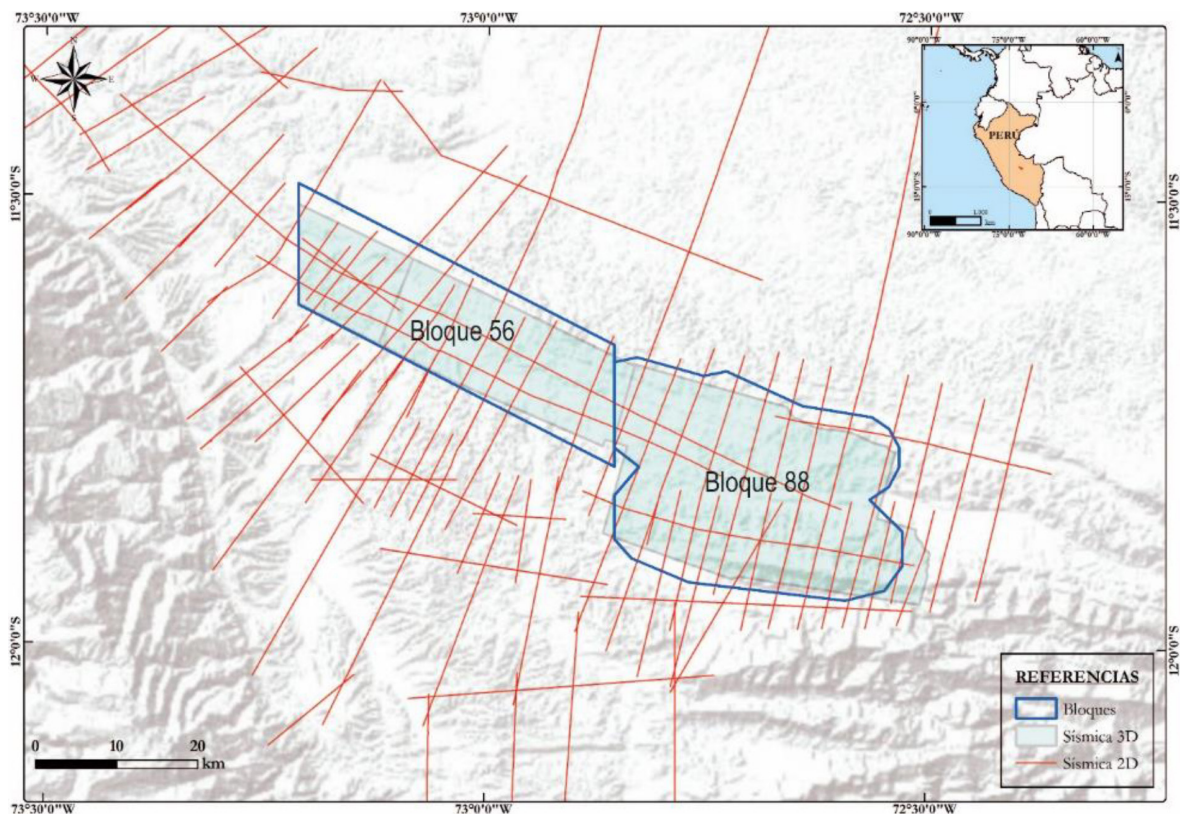


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la Cuenca de Ucayali. El presente trabajo se enfoca en el Bloque 88, donde se encuentran las estructuras de Cashiriari y San Martín.

con vergencia hacia el norte, con despegue basal en pelitas del Silúrico-Devónico y un despegue superior en niveles finos correspondientes al Paleógeno. Estas estructuras principales son las responsables de generar importantes anticlinales, de decenas de kilómetros de longitud, que actúan como trampas para las principales acumulaciones de hidrocarburos.

En el presente trabajo, se hará énfasis en los anticlinales de San Martín y Cashiriari, dos estructuras relacionadas a fallas, donde el primero es un clásico ejemplo de un pliegue por flexión de falla en el sentido de Suppe (1983), mientras que Cashiriari se interpreta como un plegamiento más complejo relacionado a una serie de corrimientos de vergencia opuesta.

METODOLOGÍA

Para la realización del trabajo, se interpretaron secciones sísmicas regionales 2D y secciones correspondientes al cubo 3D PSDM (Fig. 1). A partir de esta última sísmica, se construyeron secciones estructurales perpendiculares al rumbo de las principales estructuras estudiadas, Cashiriari y San Martín, las cuales se presentan en este trabajo.

Adicionalmente, se utilizaron topos formacionales definidos en los diferentes pozos perforados en las estructuras analizadas. Para completar la sección estratigráfica con las unidades

no alcanzadas por los mismos, se utilizó de referencia el perfil estratigráfico de superficie levantado en el Pongo de Mainique, ubicado hacia el sur de la zona de estudio (Fig. 3).

Los cortes realizados, fueron restaurados utilizando el módulo 2D *unfolding* del *software* MOVE, recurriéndose al algoritmo *flexural slip*. Este algoritmo resulta adecuado para validar la interpretación estructural realizada en fajas plegadas de lámina delgada ya que conserva los espesores de las diferentes unidades. Para la evolución cinemática, se utilizó el algoritmo de *fault-bend fold* de Suppe (1983).

MARCO GEOLÓGICO Y SISTEMA PETROLERO

La cuenca de Ucayali es una cuenca de antepaís subandina, limitada al oeste por la Cordillera Oriental, al este por el escudo Precámbrico Brasileño, al norte por el Arco de Contaya y al sur por el Arco de Fitzcarraldo.

Sobre el basamento granítico del Precámbrico, se depositaron miles de metros de sedimentos que abarcan desde el Ordovícico al Cuaternario (Fig. 2). Trabajos previos separaron la columna estratigráfica de la zona en distintos ciclos sedimentarios, basándose, no solo en la evolución sedimentaria de la cuenca, sino también en la respuesta a la deformación de cada una de las unidades (Disalvo *et al.* 2003, Disalvo *et al.* 2008, Viera *et al.* 2003).

El primer ciclo está conformado por sedimentos marinos de la Formación Contaya, de edad ordovícica que presentan un espesor de 900 metros (Sánchez Álvarez, 2007). Por encima, fue depositada la Formación Sandía, compuesta por areniscas finas con intercalaciones de lutitas y un espesor de hasta 1000 metros. Disalvo *et al.* (2008) postulan que estas rocas se comportan solidariamente con el basamento granítico, desde el punto de vista tectónico.

El tercer ciclo está integrado por el Gr. San Gabán, el Gr. Ananea y la Fm. Cabanillas, abarcando desde el Silúrico al Devónico. El Gr. San Gabán está conformado principalmente por lutitas, reconociéndose en su sección basal tilitas, las cuales Disalvo *et al.* (2008) correlacionan con la Fm. Zapla del norte argentino. Por encima se ubica el Gr. Ananea, unidad conformada por lutitas oscuras. Por último, se encuentra la Formación Cabanillas, compuesta por depósitos intercalados de sedimentos finos (Sánchez Álvarez, 2007).

El cuarto ciclo abarca del Carbonífero al Pérmico inferior y está integrado por el Gr. Ambo, Tarma y Copacabana. El Gr. Ambo se compone de areniscas finas con intercalaciones de lutitas grisáceas depositadas en un ambiente estuarino a marino más distal (Márquez *et al.* 2018). Su importancia radica en que constituyen la principal roca generadora de la cuenca (Disalvo *et al.* 2008). De manera transicional, le sigue el Gr. Tarma, el cual se compone de una serie de intercalaciones de calizas con areniscas depositadas en un ambiente marino somero (Sánchez Álvarez, 2007). Por último, el Gr. Copacabana está conformado por cientos de metros de calizas y dolomías con intercalaciones de pelitas. Esta unidad habría actuado como sello hasta el

desarrollo de los grandes corrimientos, los cuales permitieron la migración de los hidrocarburos hacia los reservorios (Disalvo *et al.* 2008).

El cuarto ciclo abarca desde el Pérmico al Precretácico. Está integrado por las formaciones Ene, Noi, Shinai y la parte basal de la Fm. Nia, totalizando un espesor de 500 metros. El límite superior del ciclo esta truncado por la discordancia base del Cretácico (Mathalone y Montoya, 1995), la cual acuña estos depósitos de oeste a este. Esta discordancia es conocida, de manera informal, como DBK.

El quinto ciclo está formado por unidades del Cretácico. La base del ciclo está limitada por la discordancia DBK mientras que, hacia el tope, la formación de paleosuelos lo diferencia

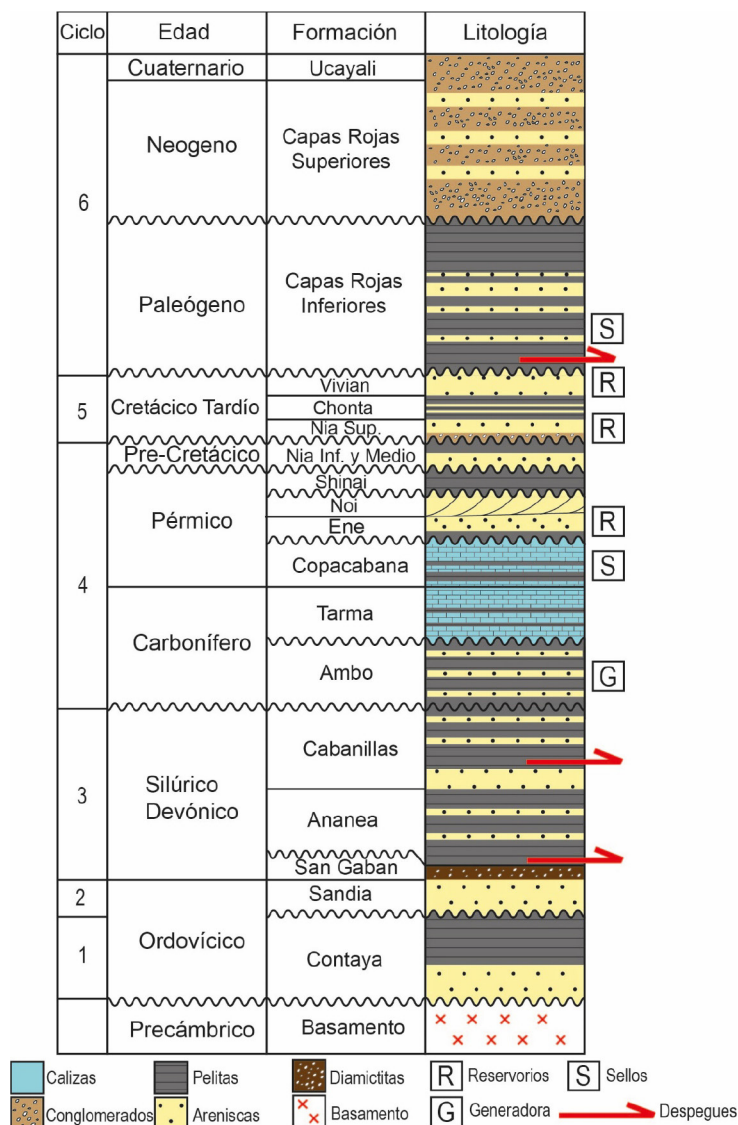


Figura 2. Columna estratigráfica de la Cuenca de Ucayali. Las flechas indican los niveles de despegue principales en la zona de estudio: Fm. Ananea, Fm. Cabanillas y Capas Rojas Inferiores.

del ciclo terciario (Disalvo *et al.* 2008). Estos dos últimos ciclos incluyen los reservorios más importantes de la zona.

El último ciclo se compone de depósitos del Terciario, pudiéndose subdividir en dos secciones, la primera, conocida como Capas Rojas Inferiores, de edad paleocena, está constituida principalmente por pelitas rojizas con intercalaciones de limolitas. Sobre esta unidad, en discordancia, le sigue los depósitos generados durante la orogenia andina conformados por lutitas, areniscas y conglomerados correspondientes a las Capas Rojas Superiores y a la Fm. Ucayali (Disalvo *et al.* 2008).

ESTRUCTURA REGIONAL

La región puede ser subdividida en tres grandes zonas (Fig. 3) de acuerdo con su comportamiento respecto a la deformación (Disalvo *et al.* 2002): (1) la faja plegada interna, donde la deformación es de piel gruesa y las estructuras involucran basamento (McClay *et al.* 2018); (2) la faja plegada externa donde la deformación es de lámina delgada y se desarrolló la faja plegada y corrida en el sentido de Boyer y Elliot (1982); y (3) una zona no deformada ubicada hacia el norte donde no se propagó la deformación andina y solo afloran rocas cuaternarias. El presente estudio se enfoca en la faja plegada externa, donde se encuentran plegamientos de rumbo principal NO-SE subparalelos entre sí. El acortamiento total de la zona externa es de aproximadamente 30% respecto a la superficie original (Disalvo *et al.* 2002).

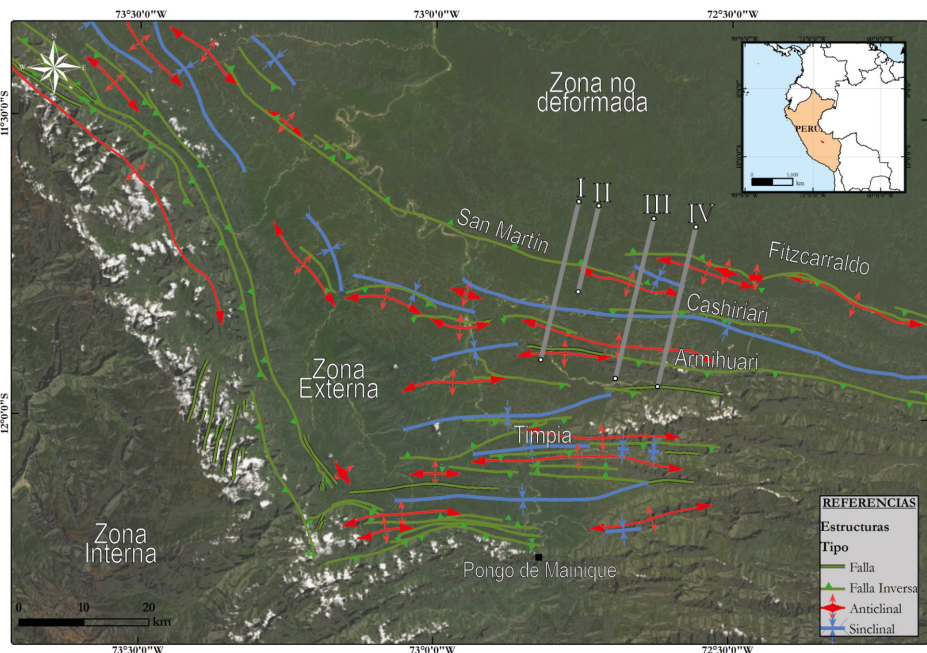


Figura 3. Mapa de estructuras regionales de la sub-cuenca de Camisea. Se indican los límites de las tres grandes zonas de deformación: faja plegada interna, faja plegada externa y zona no deformada. Adicionalmente, se señalan los cinco trenes estructurales principales y la ubicación de las secciones analizadas.

Se presentan 4 secciones estructurales a lo largo del rumbo de las estructuras de Cashiriari y San Martín con el fin de mostrar la variación de las mismas desde el NO hacia el SE (Fig. 3).

En la Fig. 4 se presenta la sección sísmica no interpretada y la interpretación de la Sección I, ubicada en el extremo occidental del área de estudio. En la misma, se observa la estructura de Cashiriari hacia el SSO y de San Martín hacia el NNE.

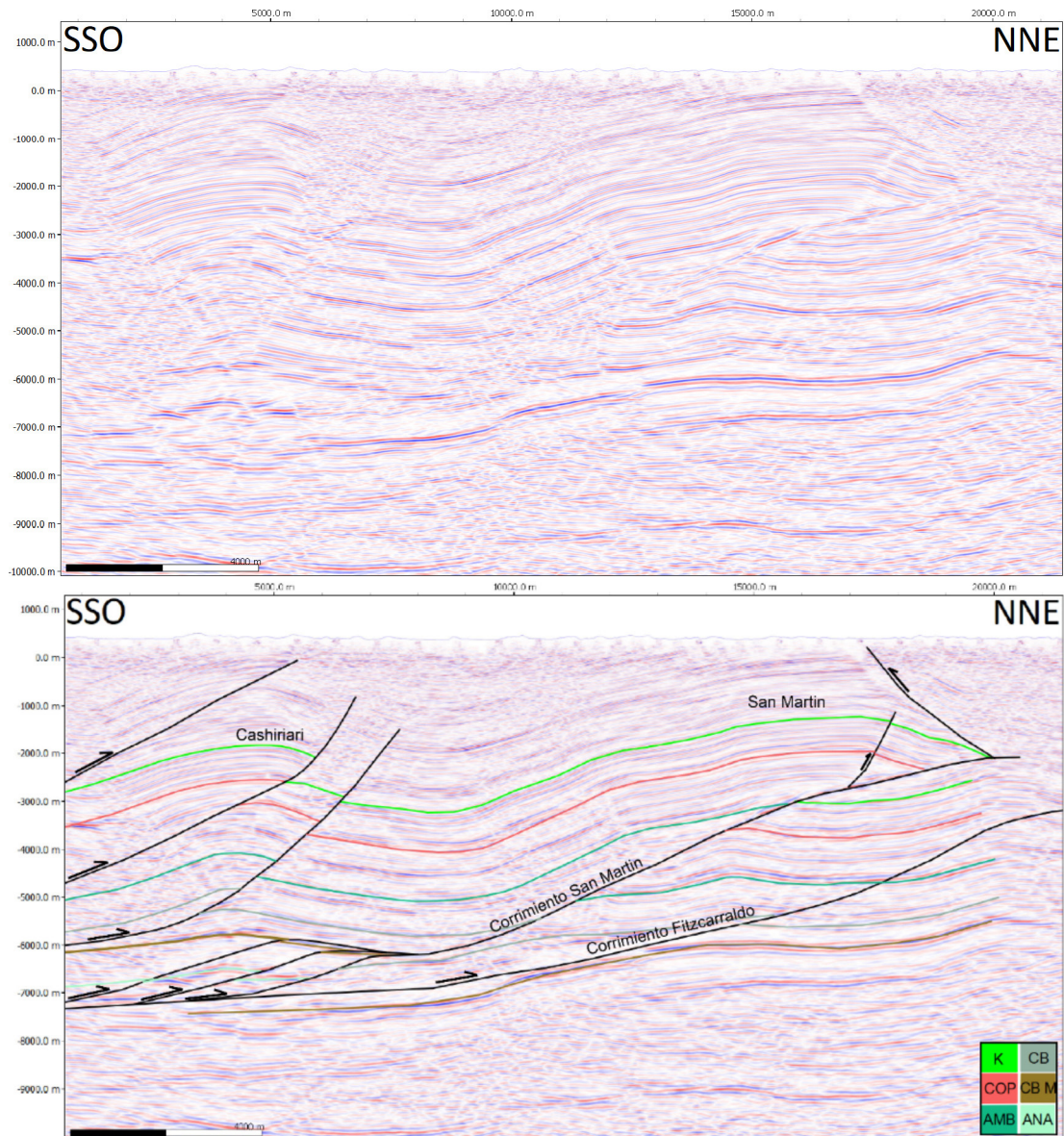


Figura 4. Sección sísmica I sin interpretar e interpretada. Ubicación indicada en la figura 3. Referencias: K: Fm. Vivian, COP: Copacabana, AMB: Ambo, CB: Cabanillas, CB M: Cabanillas Medio, ANA: Ananea.

En la parte inferior se interpreta un sistema dúplex en el sentido de McClay (1992) con despegue basal en la Formación Ananea. Estas estructuras, de relativamente poco rechazo, cortan secuencia arriba hasta un nivel de despegue intermedio en la sección media de la Formación Cabanillas. Uno de los corrimientos de vergencia NE contiene la mayor parte del rechazo y es el responsable de la generación del anticlinal de San Martín, un pliegue por flexión de falla clásico según el modelo de Suppe (1983). En total, estas estructuras presentan un desplazamiento superior a los 4000 metros en esta zona. Por otra parte, el ángulo de corte del corrimiento de San Martín se encuentra en un rango variable entre 12° a 25° al cortar la columna sedimentaria. En la cresta del anticlinal, se interpretan una serie de fallas de acomodación (Mitra, 2002) de poco rechazo y extensión. El frente de deformación termina con un retrocorrimiento el cual despega desde sedimentos paleógenos, conformando una zona triangular, donde la imagen sísmica tiene poca resolución y se dificulta la interpretación. Esta zona triangular clasificaría como de tipo II, donde participa en su generación el nivel de despegue superior (von Hagke y Malzb, 2018).

Por debajo del corrimiento principal, se interpreta el comienzo del corrimiento de Fitzcarraldo, presentándose en esta sección con poco rechazo y provocando un leve plegamiento de la estructura de San Martín. Hacia el suroeste de la sección, se interpretan dos corrimientos, los cuales atraviesan la estructura de Cashiriari, totalizando entre ambos un rechazo de casi 1500 metros. Estas fallas son interpretadas como corrimientos fuera de secuencia, generados con posterioridad a la formación del corrimiento de San Martín y Fitzcarraldo debido a su elevado ángulo de corte, el cual es superior a los 30°. En esta sección y alrededores, el anticlinal de Cashiriari es simétrico a ligeramente vergente hacia el norte.

Hacia el este de la zona de estudio, en la porción central de las estructuras (Fig. 5), Cashiriari está limitado por corrimientos de vergencia opuesta y es afectado por diversas fallas fuera de secuencia que acumulan poco rechazo. Las capas habrían sido afectadas, en un primer momento, por el corrimiento de vergencia sur, modificando su pendiente regional. Posteriormente, debido a la orogenia andina, se genera un corrimiento de vergencia norte dando origen a este anticlinal.

Hacia el NNE de la sección, se presenta el corrimiento de San Martín con el anticlinal que genera. Su limbo dorsal está cortado por un corrimiento de vergencia sur, el cual correspondería al mismo episodio de deformación que el que afecta a Cashiriari. Al igual que en la Sección I, la cresta de San Martín es cortada por una pequeña falla de acomodación. En esta sección se presenta la estructura de Fitzcarraldo con un mayor desarrollo, repartiendo el rechazo en varios corrimientos menores, los cuales pliegan las capas y al corrimiento de San Martín. Por otra parte, en esta sección no se interpreta el retrocorrimiento en las capas del Paleógeno.

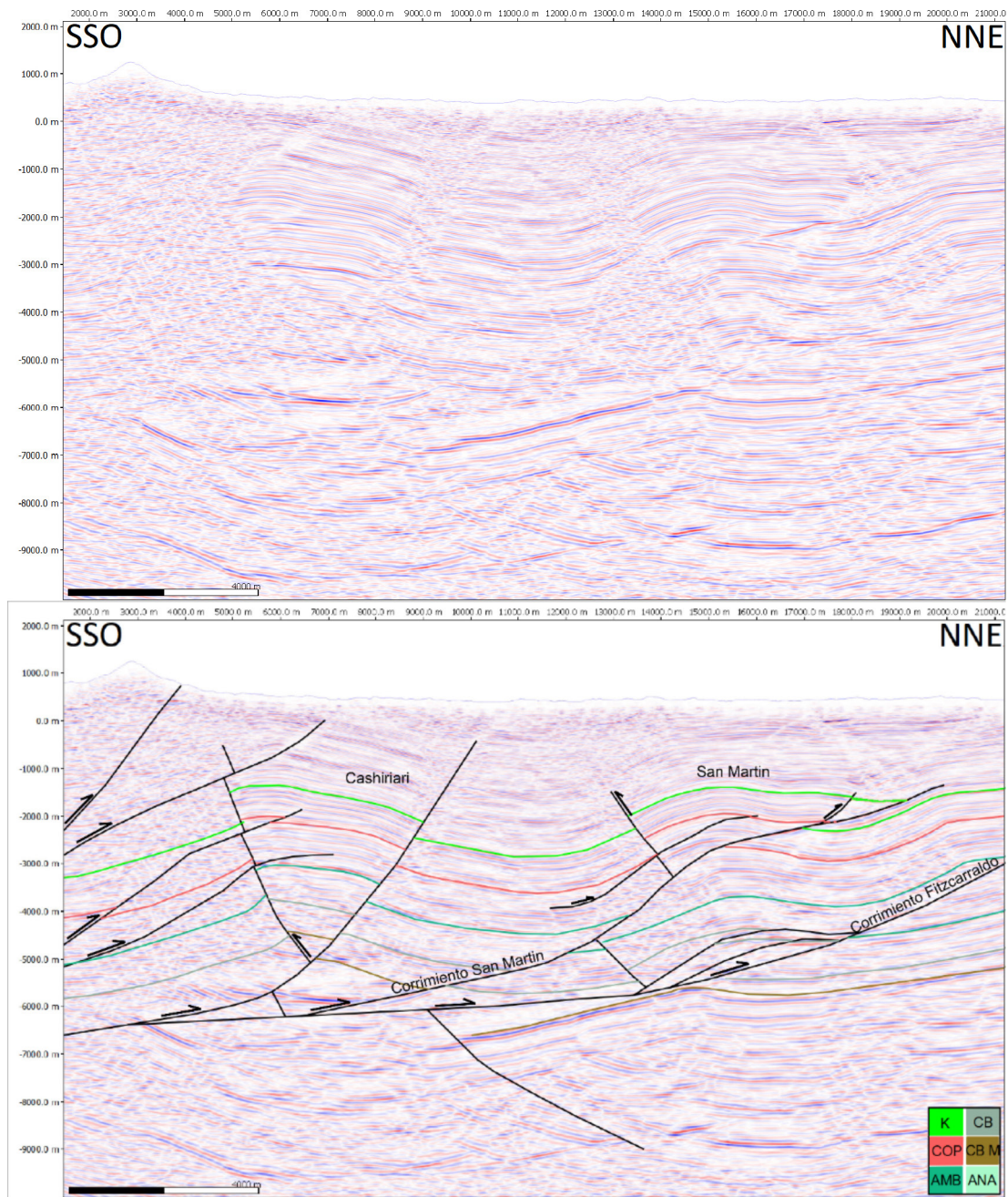


Figura 5. Sección sísmica III sin interpretar e interpretada. Ubicación indicada en la figura 3. Referencias: K: Fm. Vivian, COP: Copacabana, AMB: Ambo, CB: Cabanillas, CB M: Cabanillas Medio, ANA: Ananea.

Hacia el extremo oriental del área, en la sección correspondiente a la Fig. 6, no se interpreta el corrimiento de San Martín. Esto se debe a que esta estructura pierde rechazo hacia el este hasta desaparecer, transfiriéndoselo a la estructura de Fitzcarraldo. Esta pérdida de rechazo por parte de la estructura de San Martín se puede observar paulatinamente desde el oeste hacia el este en las diferentes secciones estudiadas. Por otra parte, en la sección se interpreta un sistema

dúplex de importante desarrollo con el mismo despegue basal que en la sección occidental. También es posible observar como la vergencia principal del anticlinal Cashiriari es hacia el sur, mientras que en el sector oeste presentaba vergencia en sentido opuesto o era levemente simétrico.

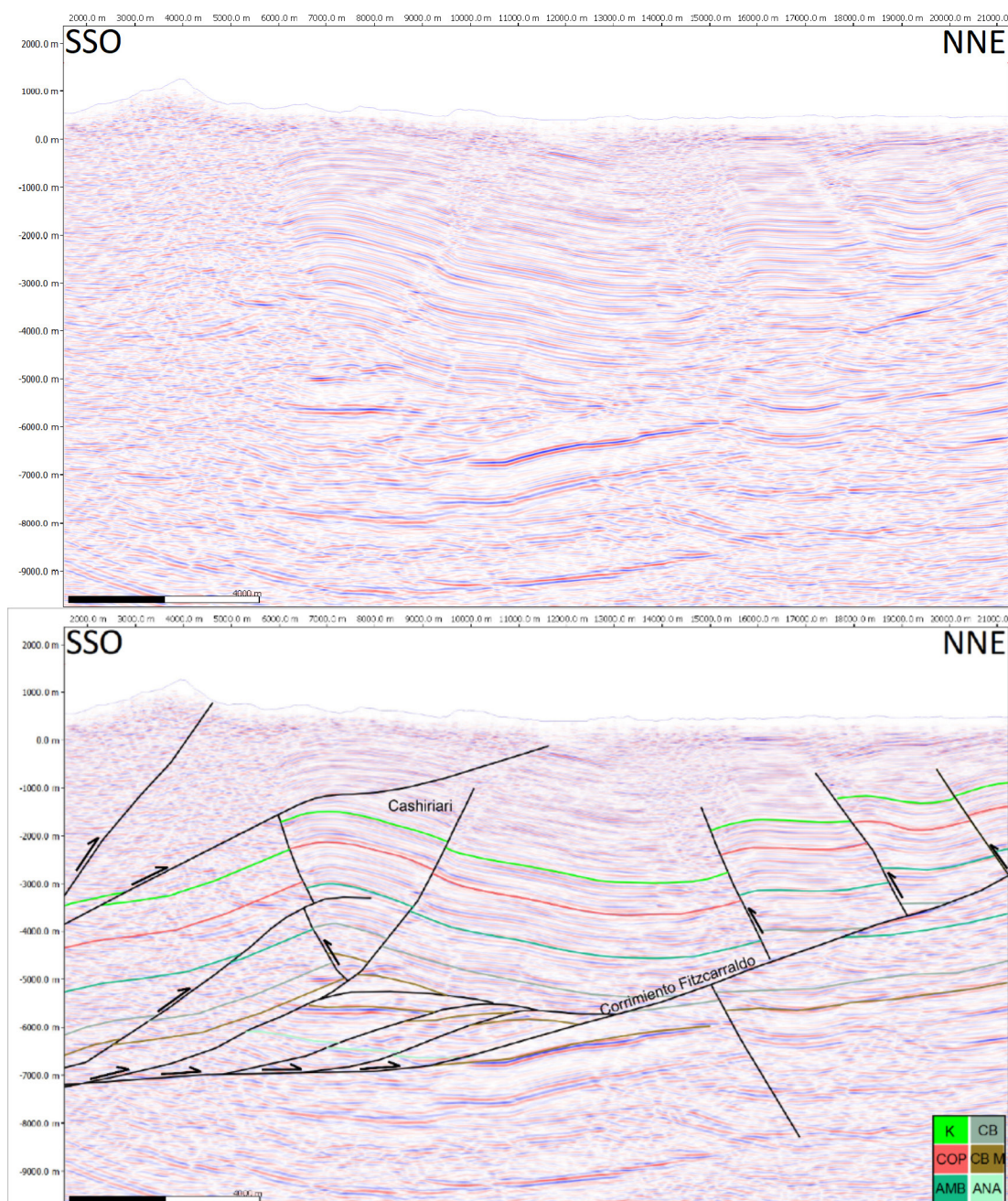


Figura 6. Sección sísmica IV sin interpretar e interpretada. Ubicación indicada en la figura 3. Referencias: K: Fm. Vi-vian, COP: Copacabana, AMB: Ambo, CB: Cabanillas, CB M: Cabanillas Medio, ANA: Ananea.

Otra diferencia respecto de la Sección I se encuentra en la presencia de una serie de fallas inversas de alto ángulo de corte y de vergencia hacia el sur, interpretadas en la Sección III. Estas estructuras acumulan un importante rechazo, alguno de ellos superando los 1000 metros. Al igual que en la sección central, se interpreta que estas fallas fueron generadas durante un estadio compresivo previo a la orogenia andina y que, posteriormente, fueron

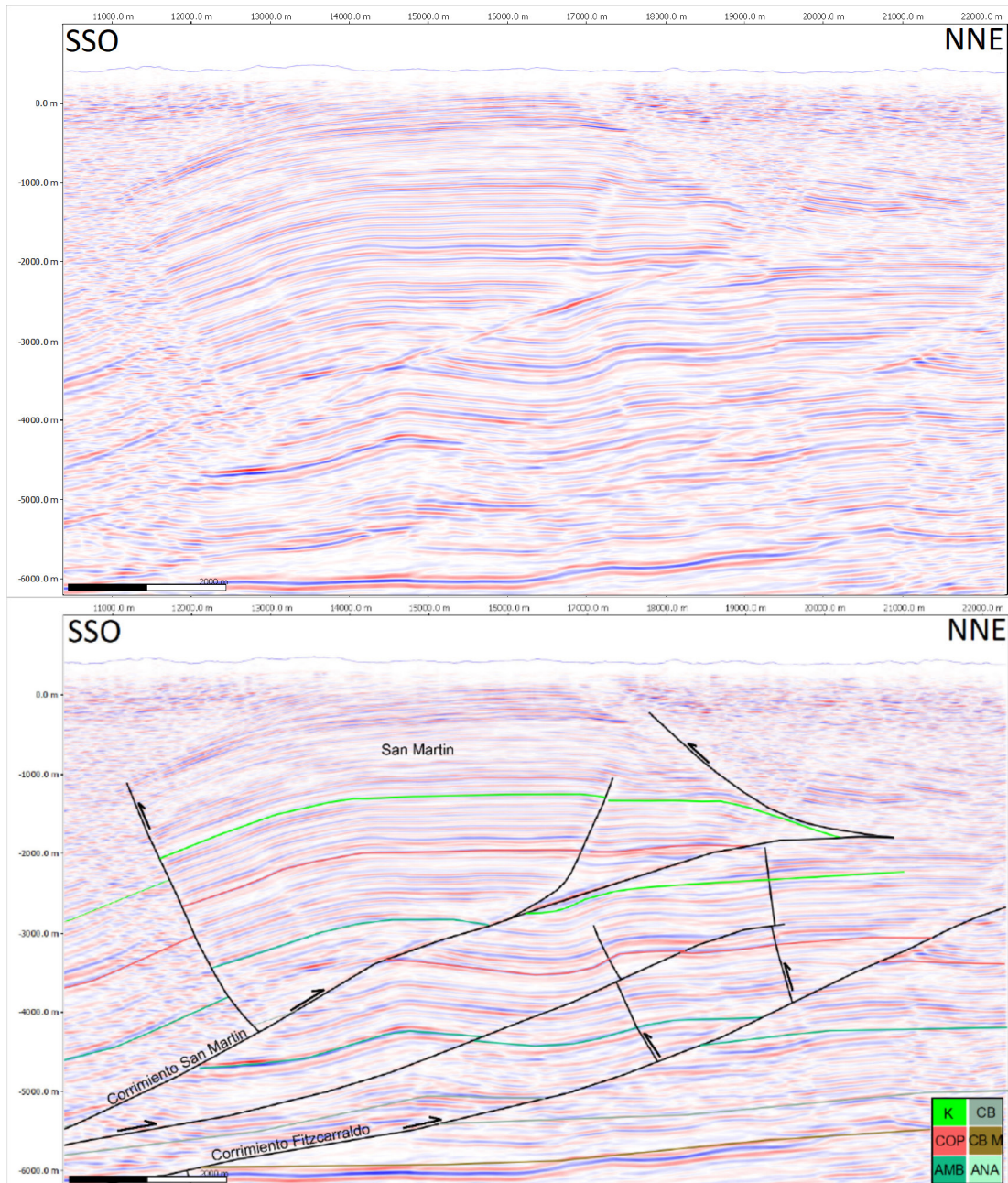


Figura 7. Sección sísmica II, donde se observa la relación de corte entre las fallas de vergencia sur y vergencia norte. Ubicación indicada en la figura 3. Referencias: K: Fm. Vivian, COP: Copacabana, AMB: Ambo.

cortadas y desplazadas por los corrimientos de vergencia norte. Se interpreta, además, que el cambio en la vergencia de Cashiriari se debería al papel preponderante que juegan estas fallas de alto ángulo hacia el este. La relación de corte entre los corrimientos de vergencia opuesta puede verse claramente en la Sección II (Fig. 7), donde se interpreta un pliegue asociado a una de las fallas de alto ángulo en el bloque bajo de San Martín. Este pliegue no afecta al corrimiento de San Martín, que lo corta de forma recta, lo que pone en evidencia una secuencia de deformación en la que las fallas de alto ángulo son cortadas y transportadas por los corrimientos de vergencia norte. También es posible interpretar en el bloque alto del corrimiento de San Martín una de estas fallas de vergencia sur, la cual no es identificada en el bloque bajo.

En base a la interpretación de estratos de crecimiento identificados en alguna estructura del área de Camisea, algunos autores, proponen un evento compresivo de edad paleógena (Baby *et al.* 2018). Tentativamente, este evento podría corresponderse con la deformación de las fallas de alto ángulo y vergencia sur, interpretadas en el presente trabajo. Por otra parte, el evento de deformación que genera los grandes corrimientos de vergencia norte correspondería al mioceno tardío (Disalvo *et al.* 2008; McClay *et al.* 2018).

EVOLUCIÓN CINEMÁTICA

Se presenta la evolución cinemática propuesta para la Sección I (Fig. 4), ubicada en el extremo occidental del área de estudio, donde no se identifican las fallas de alto ángulo y de la Sección III, ubicada hacia el SE.

Sección I

La deformación comienza con fallas de vergencia norte despegando de la Fm. Ananea conformando un antiformal *stack*. El rechazo se reparte entre estos corrimientos y da como resultado la formación del anticlinal de San Martín, a la vez que levanta la posición que ocupará Cashiriari. Posteriormente, se desarrolla un corrimiento por debajo, denominado Fitzcarraldo, el cual, en esta sección, tiene un desarrollo incipiente (Fig. 9). Por lo tanto, la deformación del corrimiento y bloque bajo de San Martín por Fitzcarraldo es menor. Se interpretan estructuras menores de acomodación desarrolladas fuera de secuencia. Simultáneamente se desarrolla un retrocorrimiento con despegue en sedimentos de Paleógeno, que frena el avance del frente de deformación hacia el antepaís. Por último, corrimientos de vergencia norte e importante rechazo cortan la estructura de Cashiriari.

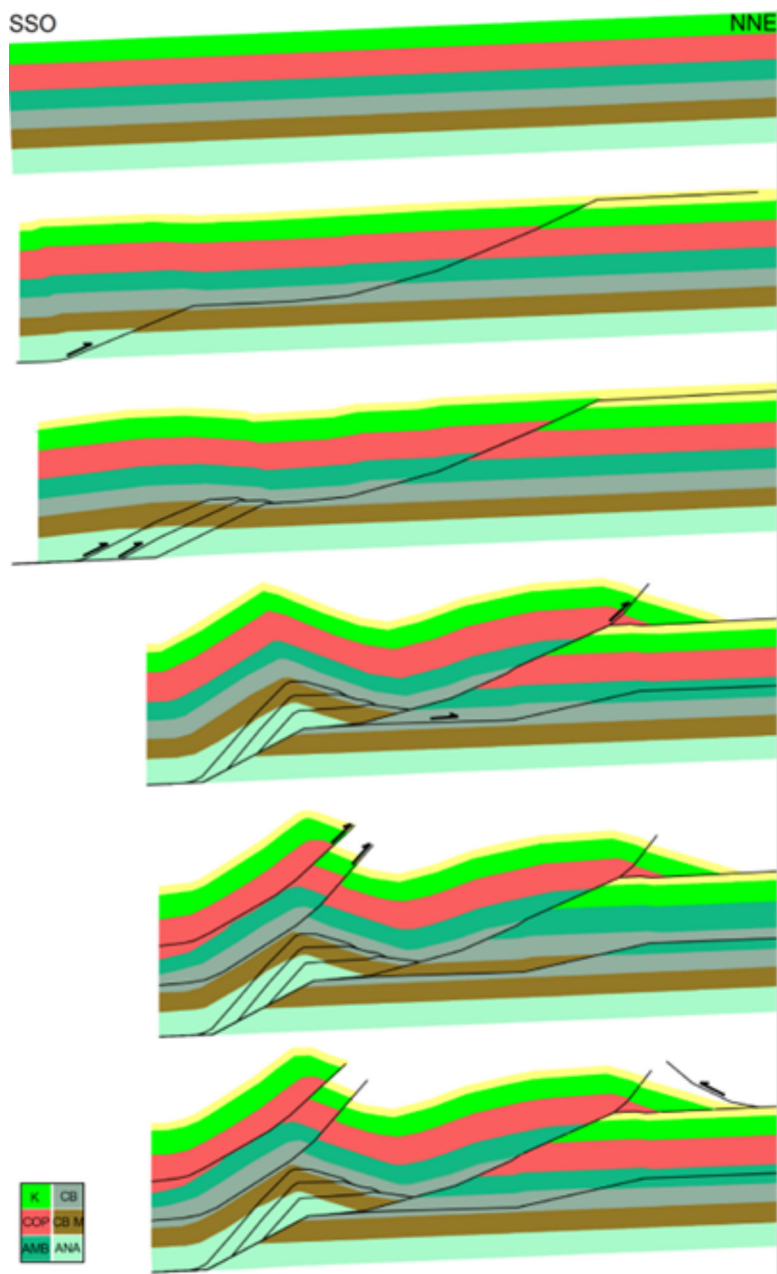


Figura 8. Modelo de evolución cinemática de la Sección I. La deformación en este sector comienza con corrimientos de vergencia norte que reparten su rechazo. Se interpreta que, posteriormente y fuera de secuencia, corrimientos con un mayor ángulo de corte afectan a la estructura de Cashiriari.

Sección III

En esta sección (Fig. 5), la estructuración comienza con fallas inversas de alto ángulo y de vergencia sur (Fig. 9) que provocan el plegamiento de los estratos. Estas estructuras son cortadas en un estadio posterior por el corrimiento de San Martín de vergencia norte. Le sigue el corrimiento de Fitzcarraldo, manteniendo un orden de secuencia de la deformación. El

corrimiento de Fitzcarraldo reparte el rechazo en una serie de corrimientos menores conformando un dúplex. En este caso, la deformación sobre San Martín es mayor, ya que se observa este corrimiento plegado. Posteriormente, y fuera de secuencia, un corrimiento de vergencia norte corta y transporta la estructura de Cashiriari, dándole su morfología final.

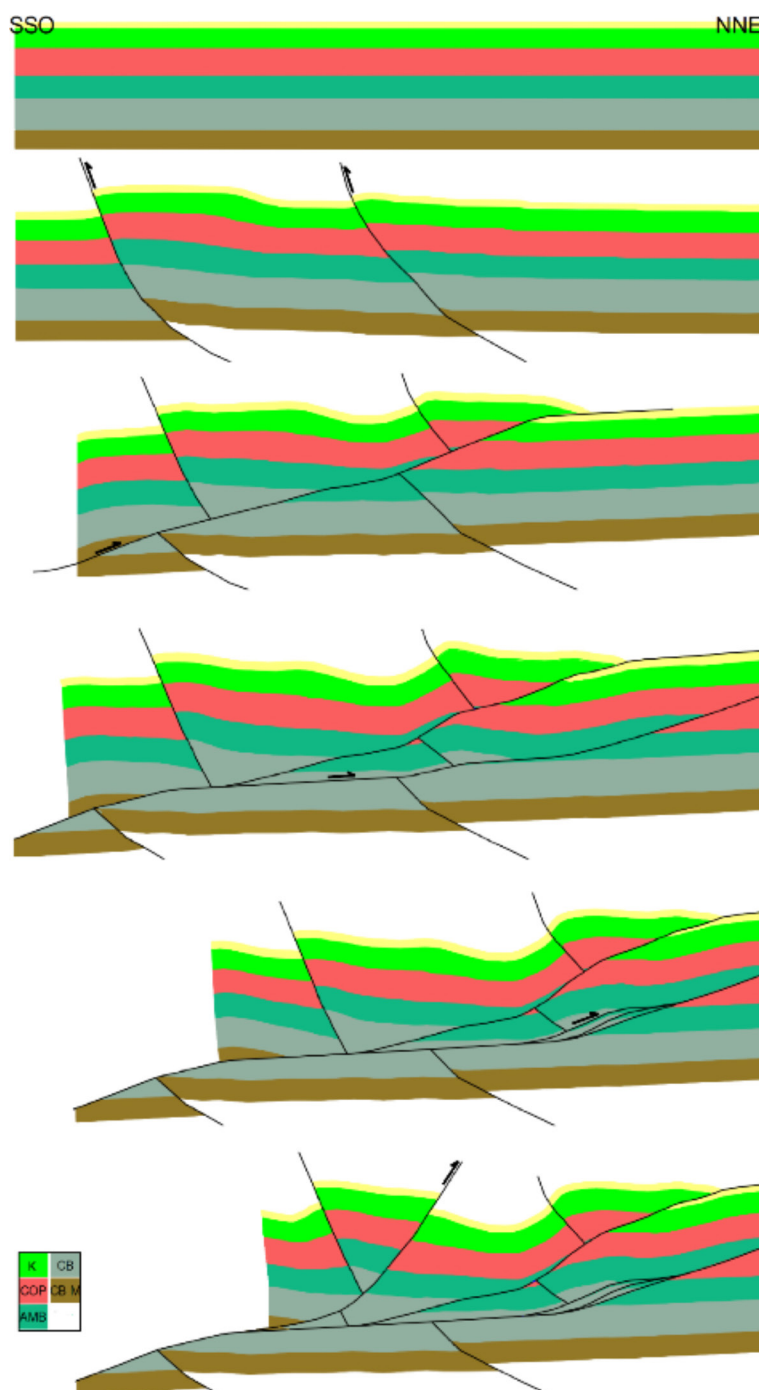


Figura 9. Modelo de evolución cinemática de la Sección III. La deformación inicial se debe a corrimientos de vergencia sur, los cuales son cortados y desplazados por corrimientos de vergencia norte.

CONCLUSIONES

El análisis estructural de la información sísmica de alta resolución permitió interpretar dos generaciones de fallamientos. En primer lugar, se generaron fallas de alto ángulo y de vergencia sur y tienen un mayor desarrollo hacia el este, donde su rechazo supera los 1000 metros. En segundo lugar, se habrían generado los corrimientos de vergencia norte cortando a los anteriores.

La estructura de San Martín es un ejemplo de un pliegue formado por flexión de falla, generado a partir de un corrimiento de vergencia norte. Este anticlinal es cortado por fallas de acomodación. Por otra parte, el anticlinal de Cashiriari, hacia el oeste, se observa como un pliegue por flexión de falla. Sin embargo, hacia el este, por la mayor influencia de estructuras de vergencia sur, su geometría se ve modificada, incluyendo su vergencia. Mientras que hacia el oeste se observa simétrico a vergente al norte, hacia al este, presenta una leve vergencia sur.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a Pluspetrol S.A. por autorizar la publicación de este trabajo. A Emilio Rocha por su ayuda en la confección de las secciones y por su lectura crítica del manuscrito y a Alfredo Disalvo por sus comentarios y revisión. Agradecemos también a los revisores por mejorar el trabajo con sus comentarios.

REFERENCIAS CITADAS

- Baby, P., Calderón, Y., Hurtado, C., Louterbach, M., Espurt, N., Brusset, S., Roddaz, M., Brichau, S., Eude, A., G  rome, G., Quispe, A., Ramirez, L., Bandach, A., Bolaños, R., 2018. The Peruvian subandean fore-land basin system: structural overview, geochronologic constraints, and unexplored plays. AAPG Memoir. En Zamora, G., McClay, K.R., Ramos, V.A. (eds.), Petroleum Basins and Hydrocarbon Potential of the Andes of Peru and Bolivia, vol. 117. AAPG, pp. 87-116.
- Boyer, S., Elliot, D., 1982. Thrust systems. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin Vol. 66, Issue 9, 1196-1230. Estados Unidos.
- Disalvo, A., Arteaga, M., Chung, J., 2002. Geometría de las trampas y análisis estructural en el área de Camisea y sus alrededores, Cuenca Ucayali, INGE-PET 2002 (EXPR-3-AD-34), Lima, Perú.
- Disalvo, A., Arteaga, M., Chung, J., 2003. Lote 88 "Camisea" Geometría y origen de las trampas de gas, Cuenca de Ucayali, Este de Peru. XII Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, vol 1, Cartagena de Indias, Colombia, pp. 62-75.
- Disalvo, A., Chung, J., Seminario, F., Lúquez, J., Arteaga, M., Gabulle, J., Davis, S., Valencia, K. y De Santa Anna, MB., 2008. Sistemas Petroleros del Gran Camisea, Sur de la Cuenca Ucayali, Perú. En C. Cruz, J. Rodríguez, J. Hechem y H. Villar (eds.), Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas, pp. 237-267.

- Lúquez, J., Disalvo, A., 2004. "Camisea Gas Field Project". Uncertainties & Technology Applied. AAPG International Conference & Exhibition, Cancún, México.
- Márquez, S., Pozo, G., Uyén, D. y Castillo, E., 2018. Análisis estratigráfico del Grupo Ambo y su implicancia en la evaluación de la roca madre – área de Camisea (cuenca Ucayali sur). IX INGEPET (GEO-EX-SM-13-N), Lima, Perú, pp. 27.
- Mathalone, J. y Montoya, R., 1995. Petroleum geology of the sub-Andean basins of Peru. En Tankard, A. J., Suárez, R., and Welsink, H. J. (eds.), Petroleum basins of South America. American Association of Petroleum Geologists Memoir 62, pp. 423–444.
- McClay, K., 1992. Glossary of thrust tectonics terms. Department of Geology, Royal Holloway and Bedford New College, University of London, Egham, Surrey, England, pp. 15.
- McClay, K., Scarselli, N., Tamara, J., Hammerstein, J., y Torres, D., 2018. Structural styles of the Camisea fold-and-thrust belt, southeast Peru. En G. Zamora, K. R. McClay y V. A. Ramos (eds.), Petroleum basins and hydrocarbon potential of the Andes of Peru and Bolivia. American Association of Petroleum Geologists Memoir 117, pp. 271–296.
- Sanchez Alvarez, J., 2007. Structural and stratigraphic evolution of Shira Mountains, central Ucayali Basin, Perú. Texas A&M University, 116 pp.
- Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science. 283, pp. 684- 721.
- Viera A., Chung, J., y Blanco Ibañez, S., 2003. Evolución Tectosedimentaria y Arquitectura Estratigráfica de los Principales Reservorios del Área Camisea. Cuenca de Ucayali, Oriente del Perú. Congreso Geológico Colombiano. Cartagena, Colombia.
- von Hagke, C. y Malzb, A., 2018. Triangle zones – Geometry, kinematics, mechanics, and the need for appreciation of uncertainties. Earth-Science Reviews 177, pp. 24–42

