

INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN DE SUBSUELO Y AFLORAMIENTO ANÁLOGO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL RESERVORIO HUITRÍN FRACTURADO

Lucía Ciano¹, Ramiro G. López², Emilio A. Rojas Vera³,
M. Agustina López Ordines⁴, Rosina C. Barberis⁵

1: YPF S.A. lucia.ciano@ypf.com

2: YPF S.A. ramiro.lopez@ypf.com

3: YPF S.A. emilio.a.rojas@ypf.com

4: YPF S.A. lop.agustina@gmail.com

5: YPF S.A. rosina.barberis@ypf.com

Palabras clave: Faja plegada y corrida, fracturas naturales, afloramiento, Fm. Huitrín

ABSTRACT

Developing an oil reservoir has the challenge of dealing with subsurface, hence indirect data. To solve this, it is important to establish a strong conceptual model that fits with the available information. In the case of natural fractures, it is critical to understand their type and origin, which will help to decrease the uncertainty when building the natural fracture model. This paper aims to show the workflow applied to study the Huitrín Formation, located in a complex structural area in the Malargüe fold and thrust belt, in western Argentina. Initially, oil field data was analyzed, involving the characterization of the natural fractures observed both in cores and borehole images, and the structural interpretation of the available 3D seismic information. To build a more accurate conceptual model of the fracture system, a study of an analogue outcrop was performed. Fracture modes, orientation, spatial arrangement, hydraulic and kinematic apertures, cement composition and abundance, and their relationship with stratification were measured through *scanlines*. Thin sections of rock samples and fracture cements collected in the field were analyzed. Cement textures, composition and cross-cutting relationships were observed and described. This information was useful to create a sequence of events that generated the different fracture *sets* through time. The integration of subsurface and outcrops data resulted essential to achieve an adequate characterization of natural fractures. These studies managed to reduce uncertainties in the geological model, providing useful data for structural interpretation, resource estimation and drilling parameters, among others.

INTRODUCCIÓN

El entendimiento de los sistemas de fracturas naturales resulta fundamental en la prospección de oportunidades en yacimientos. En este sentido, es necesario integrar la información disponible

que permita generar un modelo conceptual de las fracturas, su evolución y su impacto en la producción (López *et al.* 2018). El siguiente trabajo tiene como objetivo la caracterización de las fracturas naturales presentes en la Fm. Huitrín mediante el estudio de datos del yacimiento La Ramadita, considerado de Tipo 2 acorde a Nelson (2001) y del afloramiento considerado análogo, la sierra de Cara Cura. El área de estudio se localiza en el sector nororiental de la faja plegada y corrida de Malargüe, en el frente de deformación, donde se desarrollaron corrimientos en el Grupo Mendoza durante la orogenia andina (Giambiagi *et al.* 2008a) (Fig. 1). Allí, La Fm. Huitrín se encuentra afectada por una serie de corrimientos menores que forman anticlinales de 200 m de longitud de onda.

La metodología de trabajo involucra la interpretación de fallas y horizontes sobre sísmica 3D y el análisis de las fracturas sobre imágenes de pozo y testigos coronas del yacimiento La Ramadita. Para complementar el entendimiento del sistema de fracturas naturales de la Fm. Huitrín, se realizaron estudios en afloramientos análogos en la sierra de Cara Cura. Si bien la sierra de Cara Cura se interpreta como una estructura de piel gruesa que expone el basamento de la cuenca Neuquina, sobre su limbo dorsal presenta estructuras de piel delgada que afectan a la Fm. Huitrín. Tanto el yacimiento como el afloramiento comparten similar configuración estructural y posición dentro de la plataforma carbonática, presentando facies, espesores y anticlinales semejantes. En afloramiento se realizaron mediciones sistemáticas y no sistemáticas de las principales familias de fracturas, recolectando datos de tipos de fractura, tales como la disposición espacial, apertura cinemática, tipo y porcentaje de cementación y relación con la estratificación. En muestras recolectadas para petrografía se observaron y describieron elementos de diagénesis estructural, como texturas del cemento, composición y relaciones de corte. A partir de la combinación de los datos obtenidos se determinó la secuencia de los eventos que generaron los diferentes conjuntos de fracturas a lo largo del tiempo.

Del análisis e integración de datos de subsuelo, afloramiento y laboratorio se obtiene un modelo conceptual robusto del sistema de fracturas naturales del yacimiento. Estos estudios logran disminuir incertidumbres del modelo geológico, aportando datos útiles para la interpretación estructural, la estimación de recursos y los parámetros de perforación, entre otros.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra en el frente de deformación de la faja plegada y corrida de Malargüe (FPCM), ubicada en el sector norte de la cuenca Neuquina, en la provincia de Mendoza (34°-36° S) (Fig. 1A). Dicha faja es producto de la inversión de hemigrábenes mesozoicos de rumbo NNO originados durante la extensión que formó la cuenca Neuquina entre el Triásico Tardío y el Jurásico Temprano (Bechis *et al.* 2020). La misma ha sido identificada como híbrida, dado que existe deformación tanto de piel gruesa como de piel fina, con fallas de basamento que transfieren

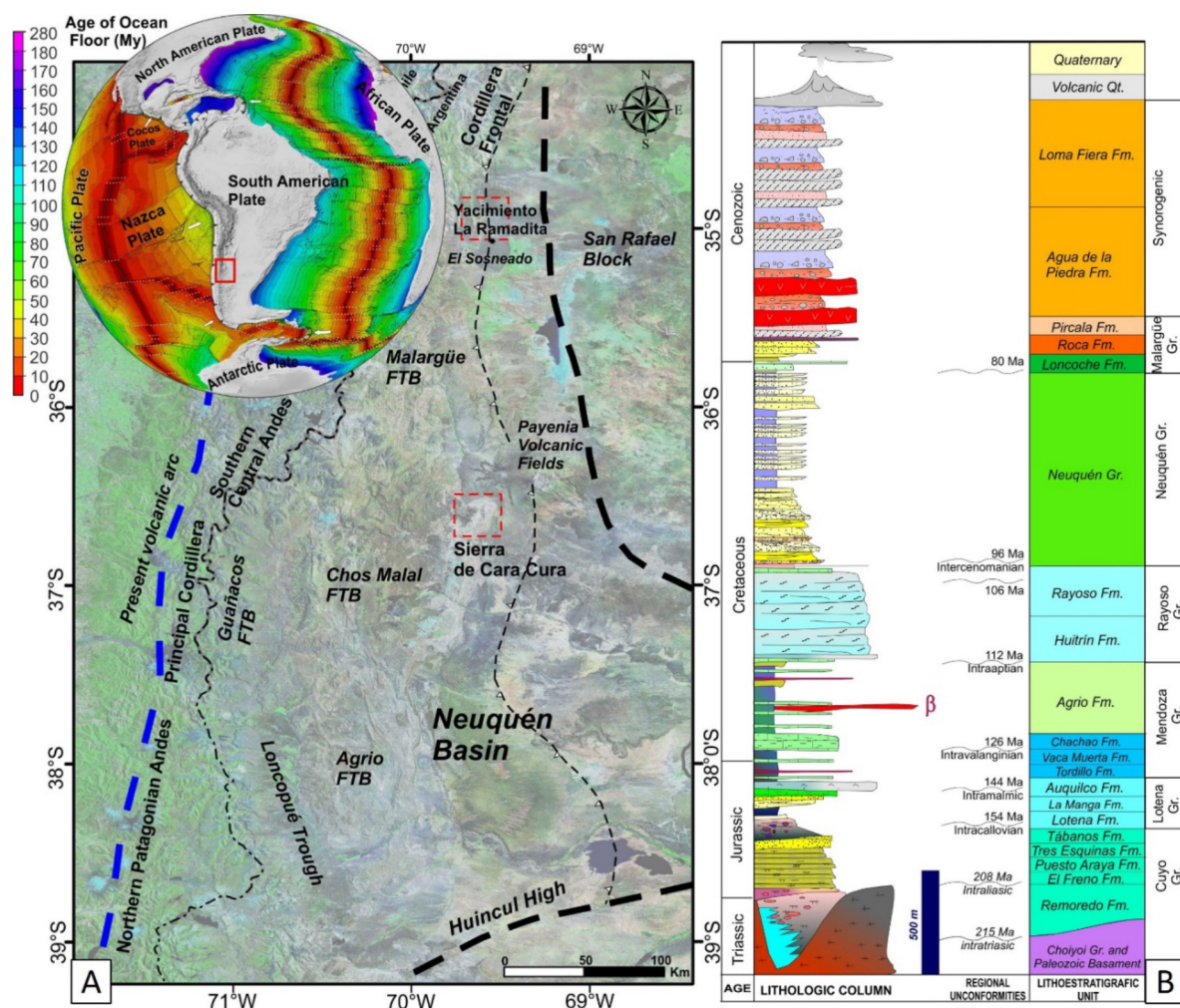


Figura 1. A) Ubicación de las áreas involucradas en este estudio en el contexto de la cuenca Neuquina: el yacimiento La Ramadita y los afloramientos de la Fm. Huitrín de la sierra de Cara Cura. B) Columna sedimentaria del área (modificada de Brisson y Veiga 1999).

el acortamiento a la cobertura sedimentaria meso-cenozoica (Kozłowski *et al.* 1993; Manceda y Figueroa 1995; Giambiagi *et al.* 2008b; Roja Vera *et al.* 2015; Fuentes *et al.* 2016; Bechis *et al.* 2020).

La columna estratigráfica para esta zona se compone de una secuencia de aproximadamente 2500 metros de sedimentos triásicos a cenozoicos, con presencia de rocas volcánicas y un basamento pre-jurásico (Fig. 1B). Los niveles reservorio de hidrocarburos corresponden a los grupos Neuquén, Rayoso y Malargüe. El foco de este trabajo es la Fm. Huitrín, parte del Gr. Rayoso, que representa una plataforma marina marginal somera con aporte terrígeno. La misma se encuentra dividida en dos miembros: Chorreado y La Tosca (Groeber 1946; Legarreta, 1985; Legarreta *et al.* 1993). El primero de ellos se compone de una alternancia de niveles de conglomerados basales, areniscas y arcillas con cementos principalmente calcáreos. El Mb. La Tosca, por su parte, corresponde a calizas naturalmente fracturadas, ocasionalmente oolíticas que presentan impregnación de hidrocarburos.

Más específicamente, el yacimiento La Ramadita se encuentra 15 km al NE de la localidad de El Sosneado, en el departamento de San Rafael, dentro del Bloque Loma de la Mina (34°S, 69°O, Figs. 1A y 2). Esta posición es cercana al límite de oriental de la cuenca Neuquina en donde la Fm. Huitrín presenta facies que corresponden a una situación de margen de la plataforma carbonática. En esta zona, los depósitos de *rift* que pertenecen al depocentro Atuel son incorporados a la FPCM como consecuencia de la inversión de la falla maestra La Manga, hace 10.5 - 9 Ma aproximadamente, durante la orogenia andina (Giambiagi *et al.* 2008a). La deformación, en este caso de piel fina, involucra el desarrollo de los corrimientos Mesón y Sosneado. El objetivo productivo en este yacimiento se ubica en un sistema de fallas que se desarrollan por debajo del corrimiento El Sosneado (Figs. 3 y 4) y forman anticlinales de 200 m de longitud de onda en la Fm. Huitrín y el Gr. Mendoza. Estas estructuras fueron identificadas como un sistema de duplex que, junto a la deformación previa, podrían ser los responsables de los sistemas de fracturas naturales en el Mb. La Tosca de la Fm. Huitrín.

Por otra parte, la Sierra de Cara Cura se localiza en el sector sur de la provincia de Mendoza (Fig. 1A), 200 km al sur del bloque Loma de la Mina. En este caso, el depocentro involucrado en la deformación es el de Cara Cura, que se localiza a la misma longitud que el depocentro del Atuel (para la ubicación de los depocentros ver los trabajos de Giambiagi *et al.* 2008b y Bechis *et al.* 2014). En esta posición la Fm. Huitrín se compone de facies de plataforma marginal con características y espesores equivalentes a los observados en los perfiles de pozos del yacimiento La Ramadita. La sierra de Cara Cura es un anticlinal, producto de una estructura de piel gruesa, formada por dos fallas de basamento con vergencia oeste, que exponen el basamento de la cuenca

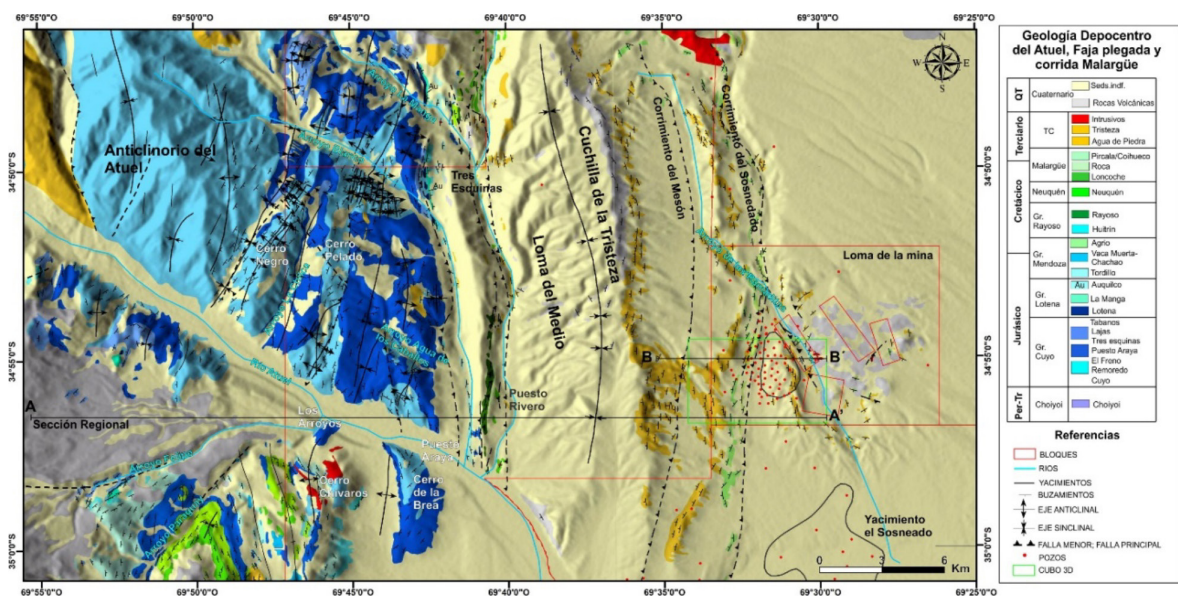


Figura 2. Mapa geológico regional sobreimpuesto a modelo de elevación construido para el proyecto de La Ramadita. A-A' representa la localización del corte estructural regional de la Figura 3. B-B' representa la localización de la sección sísmica de la Figura 4.

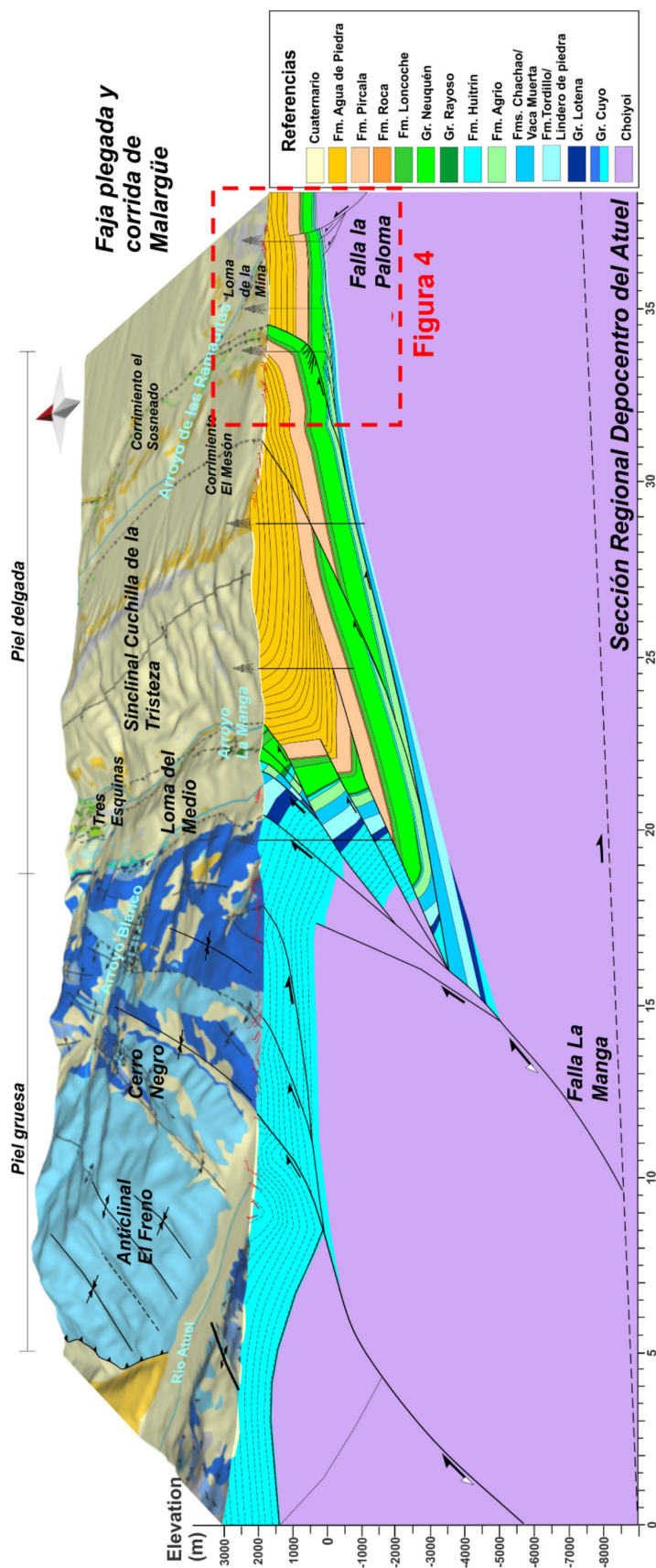


Figura 3. Sección regional O-E con mapa de geología de superficie. El recuadro rojo se corresponde a la ubicación de la figura 4. Hacia el oeste del Arroyo La Manga se desarrolla el segmento de piel gruesa de la faja plegada donde afloran las secuencias del Jurásico inferior. Hacia el este del Arroyo de La Manga se desarrolla el segmento de piel delgada donde se reconocen el sinclinal Cuchilla de la Tristeza (integrado por depósitos sinorogénicos Miocenos) y las estructuras del Mesón y el Sosneado.

Neuquina y presentan sobre su limbo dorsal, estructuras de piel delgada que afectan a la Fm. Huitrín (López Ordines *et al.* 2022). La disposición estratigráfica y estructural de la Fm. Huitrín en la sierra de Cara Cura hace de sus afloramientos un buen análogo de superficie para caracterizar los sistemas de fracturas naturales del yacimiento La Ramadita.

ANÁLISIS SÍSMICO E INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO

Para realizar la interpretación estructural del subsuelo se trabajó integrando datos de geología de superficie, pozos y sísmica 3D de la zona de estudio norte, correspondiente al yacimiento La Ramadita (Fig. 3). Las mediciones de espesores e inclinaciones de las formaciones en conjunto con la divergencia de reflectores sísmicos en las zonas de los pozos 1 y 2, permiten la identificación de dos estructuras de vergencia opuesta: en el sector oeste se encuentra el corrimiento El Sosneado, con vergencia este y deformación de piel fina; mientras que en el sector este se interpreta una falla de alto ángulo que involucra basamento, llamada La Paloma con vergencia hacia el oeste (Fig. 3 y 4) (López Ordines *et al.* 2022).

En el bloque alto del corrimiento El Sosneado se observan pequeños rechazos en la Fm. Huitrín que son interpretados como una serie de retrocorrimientos. En el bloque bajo, en cambio, los reflectores correspondientes a las Fms. Huitrín y Agrio presentan un leve plegamiento, con longitudes de onda cercanos a los 200 metros, que representan la transferencia de deformación sobre el despegue ubicado en el tope de la Fm. Vaca Muerta hacia el este.

Con el objetivo de validar esta interpretación se realizó la restauración estructural de la sección sísmica de la figura 4 mediante deslizamiento por flexión de falla en tres pasos que ilustran la deformación y el acortamiento durante la evolución del área. En la Figura 5, de abajo hacia arriba pueden observarse: (A) Etapa previa a la deformación concomitante con la depositación del Gr. Malargüe, hace 45 Ma; (B) Acortamiento durante el Mioceno Temprano-Medio, acorde a datos de termocronología reportados en el anticlinal de Cuchilla de la Tristeza al oeste (Bande *et al.* 2020). Este evento desencadenó el desarrollo del corrimiento El Sosneado a través del despegue en la base de la Fm. Agrio y formando un pliegue de propagación de falla. El acortamiento en este período para el tramo estudiado es de unos 0,5 km (30,6%); (C) Estadio final, corresponde al Mioceno tardío en base a los datos termocronológicos que indican que el segmento frontal oriental del FPCM fue exhumado durante este tiempo (Bande *et al.* 2020). En el área de estudio, este evento produce un importante desplazamiento en el corrimiento El Sosneado, con desarrollo de retrocorrimientos en el bloque alto y una serie de corrimientos y pliegues menores en el bloque bajo como consecuencia de la transferencia de acortamiento hacia el este. Es en el transcurso de este período cuando la zona de falla de La Paloma se activa e involucra al basamento en la deformación. La deformación de piel gruesa asociada a esta zona de falla se desarrolló desde los 9 Ma y continúa hasta el presente. El acortamiento mínimo estimado para la sección es de 1,7

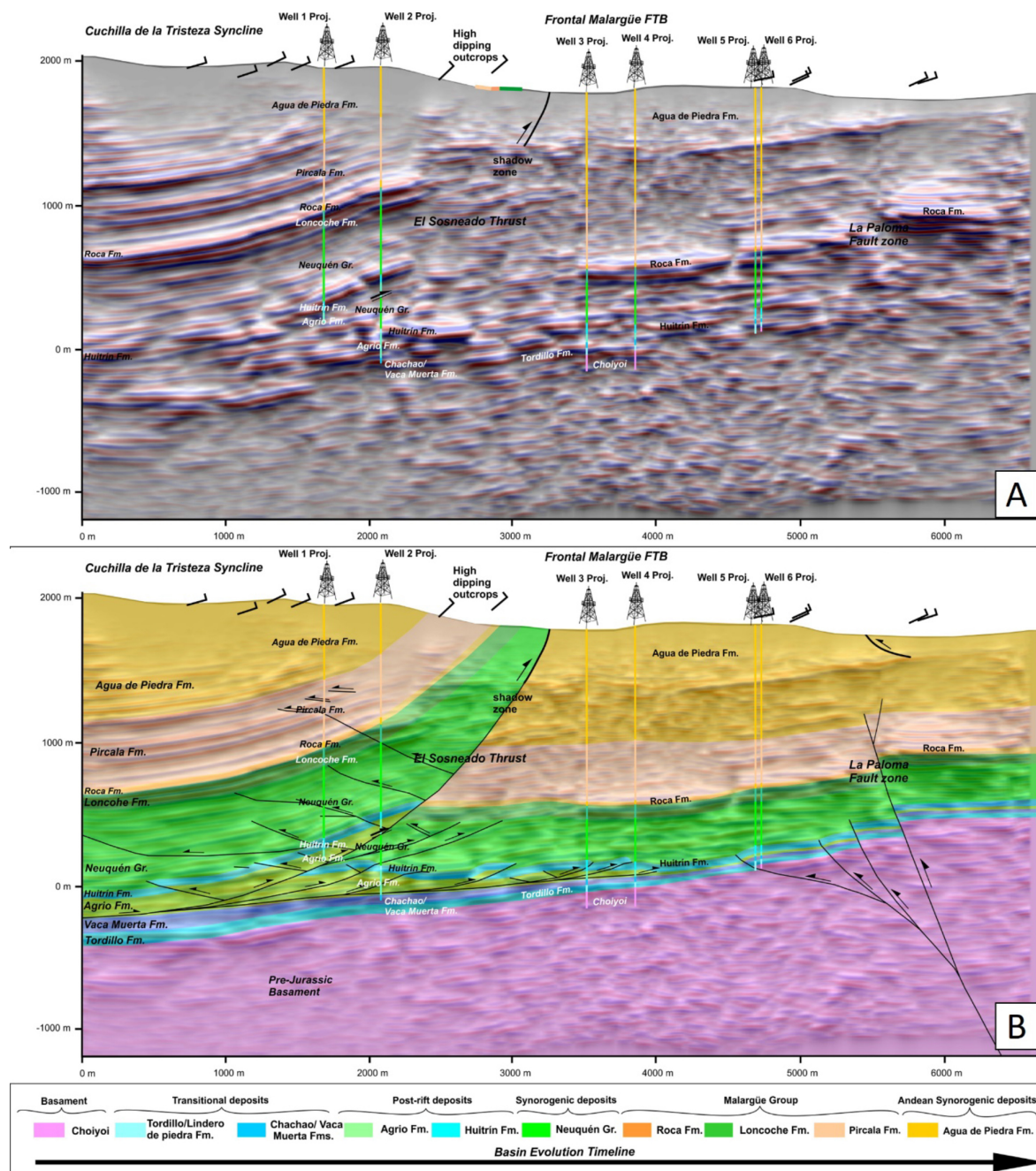


Figura 4. Sección de sísmica O-E, de amplitud PSDM, con atributo TecVa. Incluye datos de pozos del yacimiento La Ramadita y geología de superficie. A) Sin interpretación. B) Con interpretación estructural (ver ubicación en Figs. 2 y 3). En estas figuras puede observarse la deformación de piel fina con vergencia este en el sector occidental, y la deformación de piel gruesa con vergencia oeste en el oriental.

km (100%), aunque se trata de una aproximación dado que la columna estratigráfica mesozoica y neógena se encuentra erosionada (López Ordines *et al.* 2022).

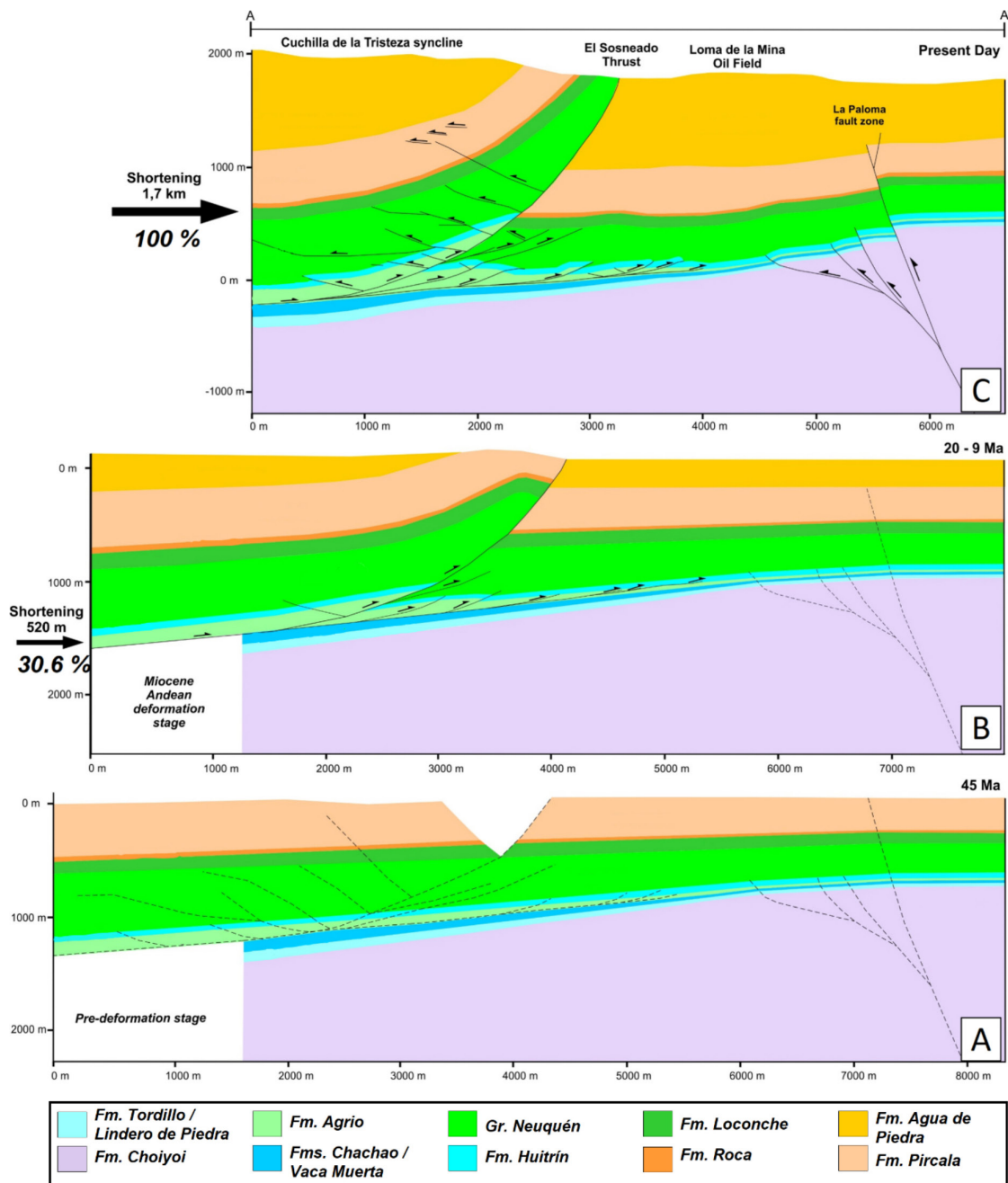


Figura 5. Restauración cinemática esquemática de la sección sísmica interpretada. (A) Etapa previa a la deformación hace 45 Ma. (B) Acortamiento del Mioceno Temprano-Medio con el desarrollo del corrimiento El Sosneado. (C) Estado final, Mioceno tardío, con importante desplazamiento en el corrimiento de El Sosneado y activación de falla de La Paloma involucrando al basamento.

ANÁLISIS DE DATOS DE FRACTURAS NATURALES OBSERVADAS EN SUBSUELO

En una primera instancia se realizó el relevamiento y análisis de la información de subsuelo disponible en el yacimiento La Ramadita, donde se encontró evidencia de la existencia de un sistema de fracturas naturales en datos de testigos corona e imágenes de pozo. En lo que respecta a

testigos corona, sólo fueron extraídos en dos sondeos del yacimiento. Estos presentan una litología compuesta principalmente por calizas tipo grainstones con intercalaciones de tipo *mudstone* y en ellos se observa porosidad tanto en la matriz como en las fracturas naturales, en ambos casos con abundantes rastros de hidrocarburos (Fig. 6). Además, se identificaron estilolitas verticales y horizontales y, con menor frecuencia, bandas de deformación y diques clásticos. Debido a que no es posible orientar estos testigos, sólo se midieron magnitudes de buzamiento de entre 50 y 70 grados.

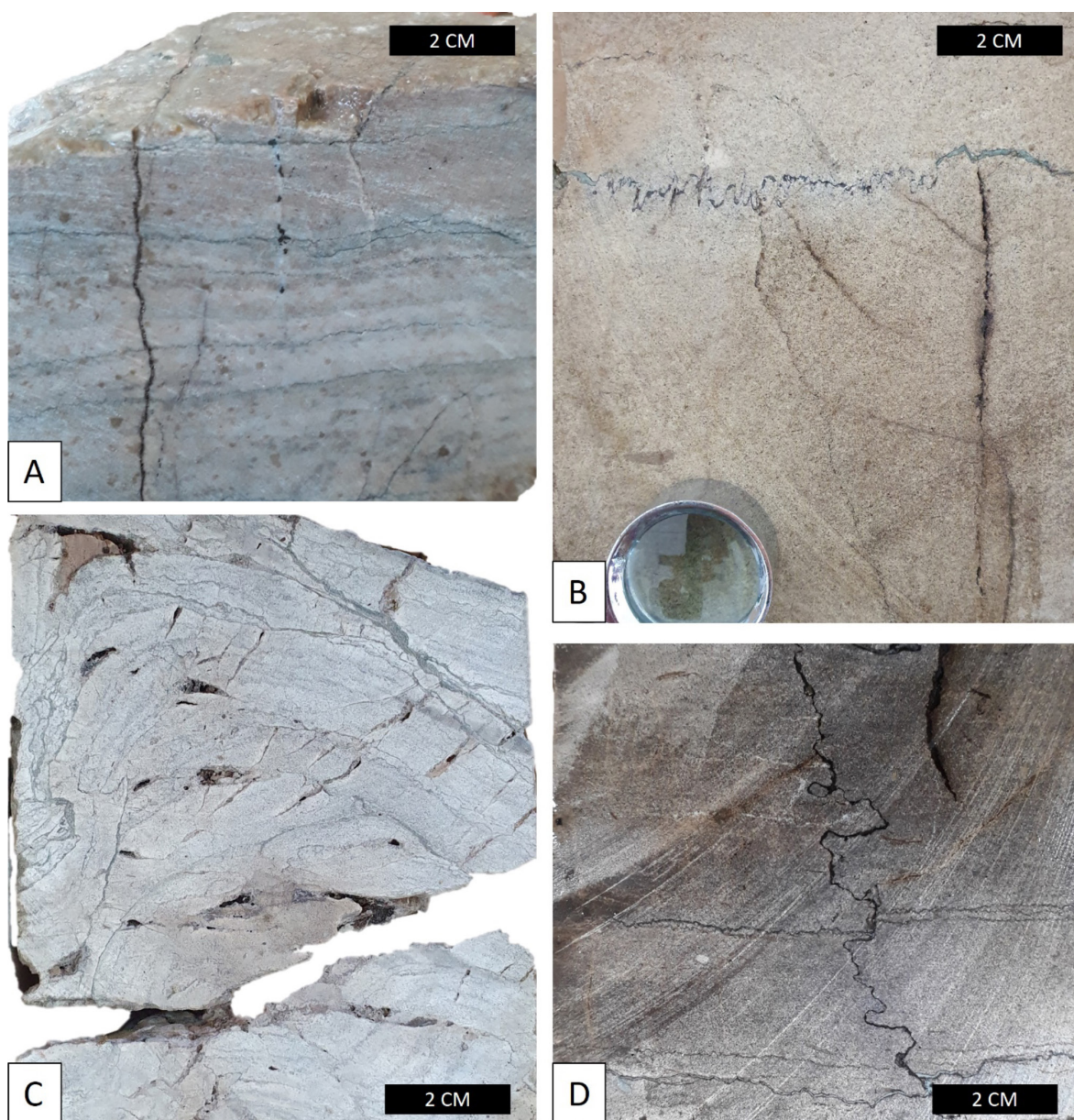


Figura 6. Ejemplos de fracturas naturales observadas en coronas del yacimiento La Ramadita. A) Fractura natural rellena con hidrocarburo. B) Estilolita horizontal. C) Pliegue de pequeña escala en niveles carbonáticos, con fracturas con porosidad asociadas. D) Estilolita vertical.

En cuanto a las imágenes de pozo, en el yacimiento La Ramadita se tomaron 6 registros en la Fm. Huitrín, dos de los cuales no disponen de datos suficientes para ser considerados representativos, mientras que en los cuatro restantes se pudieron identificar diferentes conjuntos de fracturas naturales. Los pozos A, B y C son verticales y muestran la estratigrafía mecánica interna de la Fm. Huitrín, ya que existe mayor intensidad de fracturas en calizas que en lutitas. En estos pozos puede observarse la presencia de *sets* de fracturas NO-SE, N-S y NE-SO, todas ellos casi verticales. Dada la coincidencia entre la verticalidad del pozo y la inclinación de los *sets* de fracturas, la intensidad observada sería menor que la real. Por otro lado, el Pozo D es horizontal, y refleja la intensidad del conjunto de fracturas de orientación E-O, perpendiculares a la trayectoria del mismo. La intensidad de las fracturas observadas para este conjunto está entre 1 y 3 por metro (Fig. 7).

Dado que los pozos se ubican en distintas posiciones respecto a la estructura, es posible reconocer en ellos una marcada variabilidad en términos de orientación de las fracturas (Fig. 7). Esto está relacionado con la diferencia en el contexto estructural local donde se ubica cada pozo. Por esa razón, el análisis de un afloramiento análogo tiene un gran impacto en la comprensión de la distribución 3D y la variabilidad del sistema de fracturas.

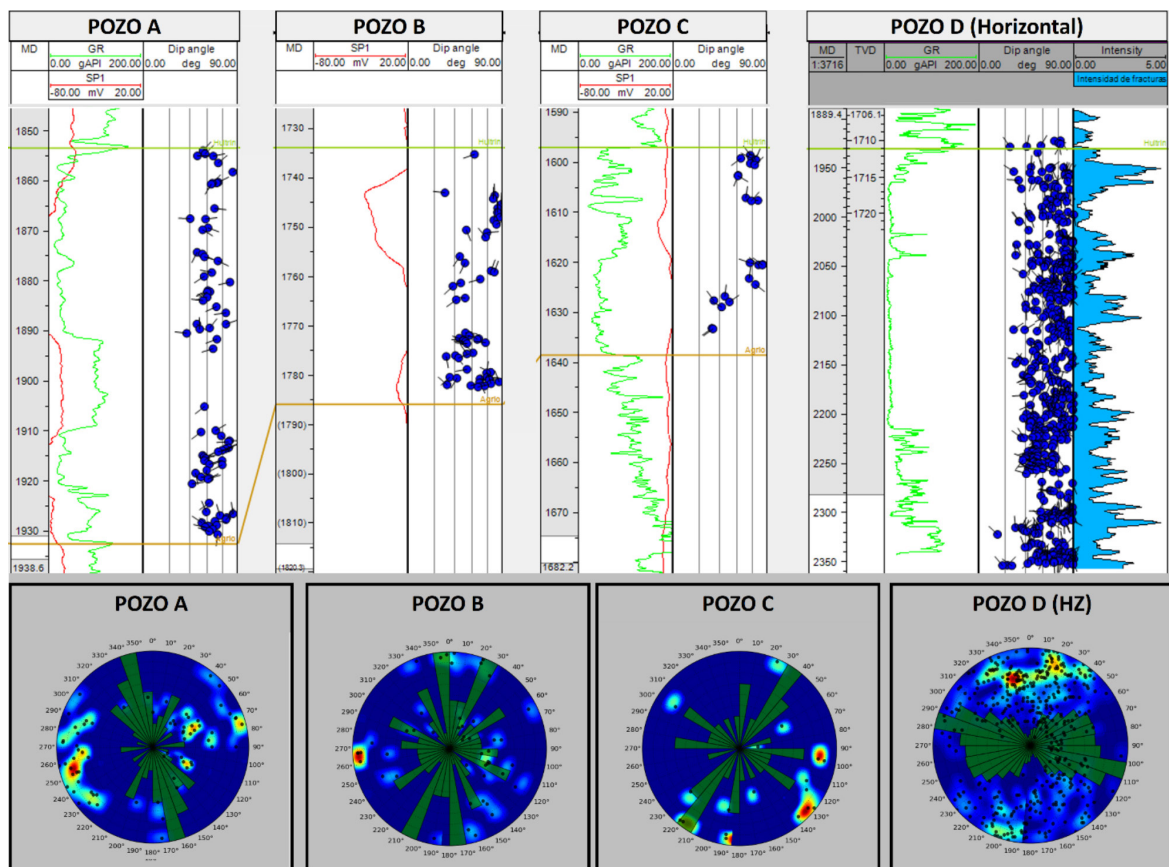


Figura 7. Arriba: Datos de fracturas naturales observadas en registros de imagen de pozo verticales y horizontales. Abajo: Proyecciones estereográficas de rumbo de los *sets* de fracturas de cada pozo, con remoción de la componente estructural local.

TRABAJO DE CAMPO

La necesidad de construir un modelo conceptual de las fracturas naturales en el subsuelo para la Fm. Huitrín condujo a la propuesta de obtener datos de un afloramiento análogo. A partir del análisis de afloramientos disponibles de la Fm. Huitrín y su estructura, se seleccionó la sierra de Cara Cura como análogo apropiado de superficie (Fig. 1).

Durante el reconocimiento de superficie se identificaron dos afloramientos de la Fm. Huitrín sobre el limbo dorsal del anticlinal que genera la sierra, hacia el hundimiento sur de la estructura (Fig. 8). En este sector, la Fm. Huitrín se apoya sobre las pelitas de la Fm. Agrio y está conformada

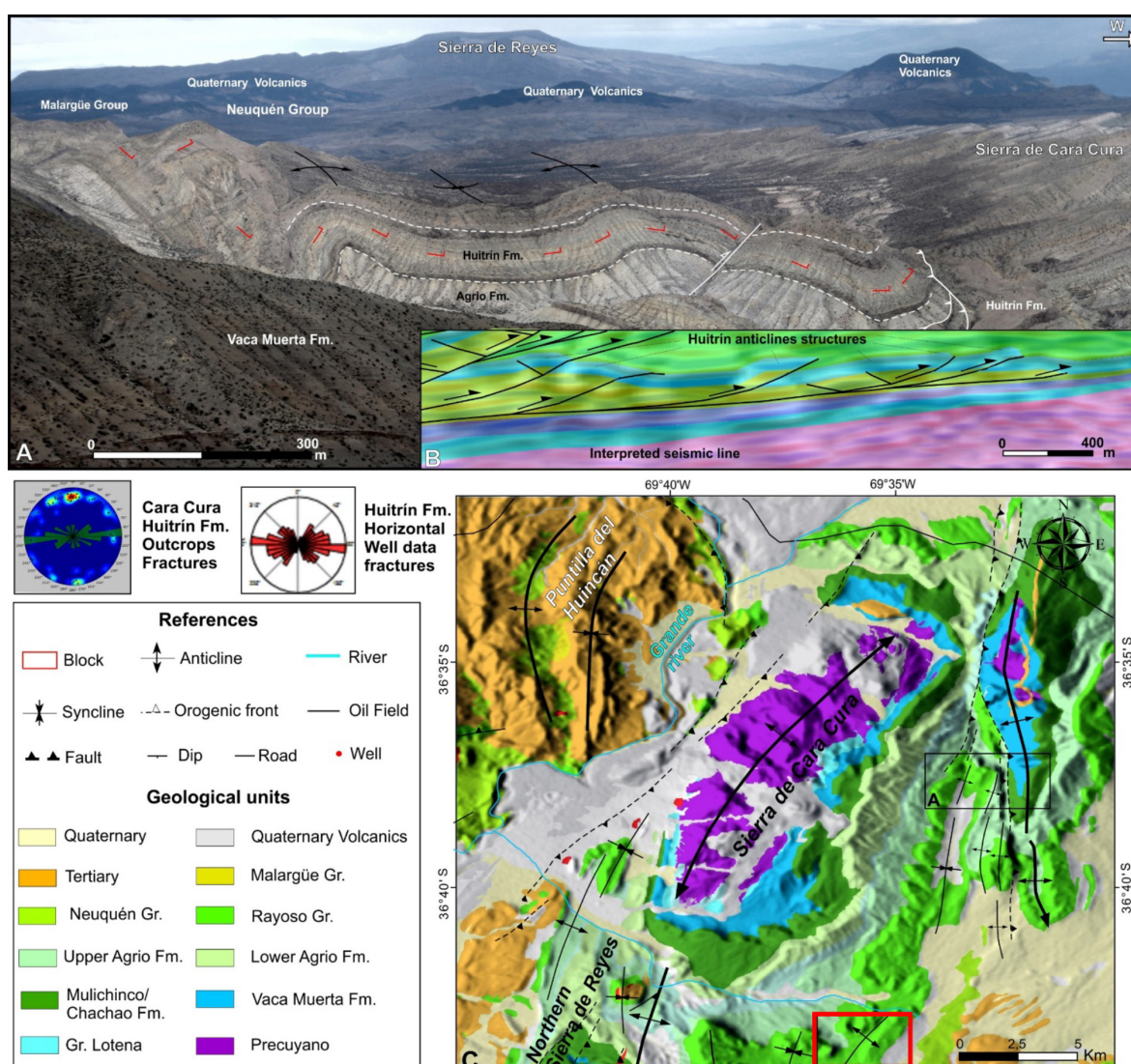


Figura 8. (A) Vista sur de la sierra de Cara Cura donde se observan los pliegues análogos a los observados en el yacimiento La Ramadita para la Fm. Huitrín. (B) Pliegues interpretados en sísmica para el yacimiento La Ramadita. (C) Mapa geológico de la sierra de Cara Cura, en el recuadro rojo se indica la zona donde se realizaron los *scanlines* y el mapeo general. En las rosetas se observan las direcciones de las fracturas del afloramiento en la sierra de Cara Cura (izquierda) y del pozo horizontal del yacimiento La Ramadita (derecha).

de base a techo por un nivel de yeso estratificado basal llamado “Yeso de Transición”, por encima un nivel de areniscas con canales amalgamados pertenecientes al Mb. Troncoso, luego otro nivel de yeso estratificado y, coronando esta secuencia, las calizas que pertenecen al Mb. La Tosca. A su vez, para la Fm. Huitrín se reconoce una estructuración de menor escala en forma de anticlinales de pequeña longitud de onda, análogo a lo observado en la sísmica de subsuelo del yacimiento La Ramadita (Fig. 8A.).

La identificación de fracturas naturales se realizó para el Mb. La Tosca, en el que se observaron 3 *sets* de fracturas principales: NE-SO, NO-SE y E-O y un cuarto *set* subordinado N-S, todas ellas perpendiculares a subperpendiculares respecto a la estratificación (Fig. 9). Debido a la meteorización del afloramiento, la identificación de los cementos fue compleja. En los casos en que podía observarse, se trataba de un relleno calcáreo, con aperturas de entre 2 y 4 mm, generalmente con texturas “diente de perro” indicando un modo de apertura principalmente tensional. En las fracturas se observó una importante porosidad visual, alcanzando estimaciones de 50% en algunos casos (Fig. 10).

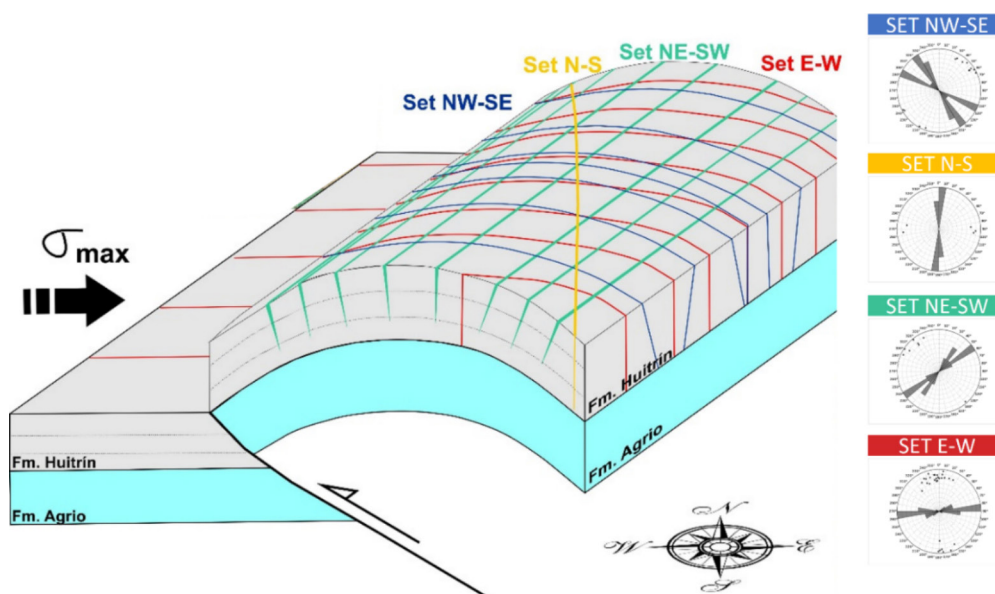


Figura 9. Block diagrama de los *sets* de fracturas naturales observados en el afloramiento. Proyecciones estereográficas de rumbo de cada set medido. Los datos proyectados están restaurados a la horizontal.

Con el objetivo de recolectar una cantidad de datos con significado estadístico, se realizaron 3 *scanlines*, perpendiculares a los principales *sets* observados en el campo (Ukar *et al.* 2019; López *et al.* 2022). En ellos se detalló información de las fracturas observadas: espaciamento, longitud, apertura cinemática, tipo de relleno y características de sus terminaciones. Además, se realizó un mapeo general de un área más extensa registrando las fracturas con cementación con el fin de obtener una estimación de la porosidad de fractura. Posteriormente, se tomaron muestras orientadas de los principales *sets* de fracturas naturales para analizar en laboratorio.

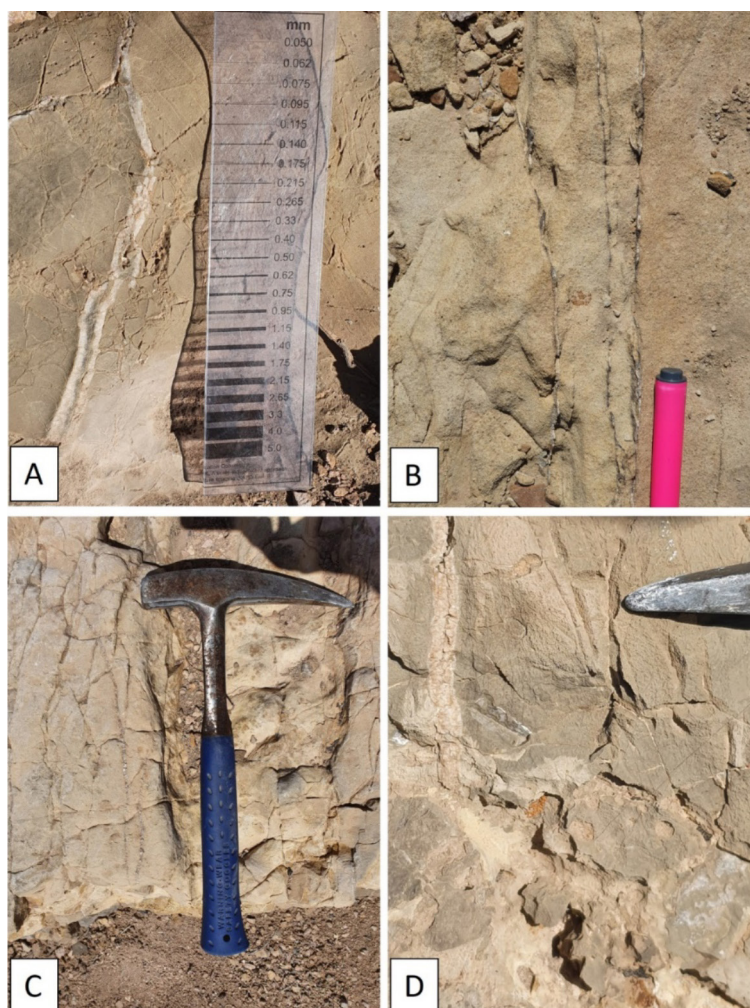


Figura 10. Ejemplos de fracturas naturales observadas en los afloramientos analizados. (A) Fractura rellena por cemento calcítico con evidencia de desplazamiento por cizalla. (B) Fracturas con apertura cinemática variable (C) Fracturas con relleno calcítico con textura mosaico. (D) Fractura con relleno calcítico con textura “diente de perro”.

Análisis de datos de *scanlines*

En la siguiente tabla se muestra el análisis realizado sobre los datos medidos en las *scanlines*. Es importante notar que para los *sets* NE-SO (*scanline* 1) y NO-SE (*scanline* 2) se midieron alrededor de 100 fracturas respectivamente, mientras que para el set E-O (*scanline* 3) sólo se alcanzó a relevar 40 fracturas (Fig. 11). A su vez, el set E-O fue registrado en el afloramiento sur, el cual presentaba un grado de meteorización más avanzado que el afloramiento norte. Estos factores hacen que los datos del *scanline* 3 tengan un menor grado de representatividad estadística.

SCANLINE	1	2	3
AFLORAMIENTO	Norte	Norte	Sur
ORIENTACIÓN CAPA (RBZ)	56°/8°	56°/8°	247°/31°
DIRECCIÓN SCANLINE (RBZ)	313°	45°	0°
LONGITUD SCANLINE (m)	17	13	13.2
SET DE FRACTURAS MEDIDO	NE-SO	NO-SE	E-O
LARGO PROMEDIO DE FRACTURAS (m)	0.47	0.31	0.17
FRACTURAS MEDIDAS	102	105	41
FRACTURAS POR METRO	6.6	8.1	3.4
ESPACIAMIENTO (m)	0.15	0.12	0.30
APERTURA CINEMÁTICA (mm)	1.30	0.67	1.35
APRECIACIÓN DE RELLENO (%)	90	78	90

Figura 11. Resumen de datos obtenidos de los *scanlines*.

En lo que respecta a la cantidad de fracturas por metro, los *sets* NE-SO y NO-SE presentan valores similares de 7 y 8 respectivamente; mientras que para el *set* E-O se observa un espaciamiento mayor, con un promedio de 3 fracturas por metro. Los largos promedio de las fracturas son inferiores a los 50 cm para los 3 *sets*; sin embargo, en el afloramiento se observó que algunas fracturas individuales formaban parte de un conjunto de fracturas que formaban lineamientos a través del afloramiento completo.

Otros datos relevados en las *scanlines* son los referentes a las características de las terminaciones de las fracturas, ya que su análisis puede indicar el orden cronológico de generación de los *sets*. En este caso, para los *sets* NE-SO y NO-SE se observaron relaciones de corte mutuas, lo cual indica que son contemporáneos. En cambio, el *set* E-O se trunca mayormente contra los otros dos, indicando que es posterior. Este dato es acorde con la menor longitud descripta para este *set*. En cuanto al valor de apertura cinemática promedio para cada *set*, la representatividad es baja ya que eran pocas las fracturas que preservaban el cemento en los pavimentos en que se realizaron las *scanlines*. En función de esta particularidad es que se decidió realizar un mapeo general de fracturas para el área de estudio, el cual se describirá más adelante en este trabajo.

Para evaluar la distribución espacial de las fracturas naturales de cada *set*, se cargaron los datos de las *scanlines* en el *software Correlation Count* desarrollado por el FRAC (*Fracture Research and Application Consortium* de la Universidad de Texas) (Fig. 12). Este programa utiliza los datos de espaciamiento de fracturas naturales medidos y los muestra en comparación con una distribución aleatoria, y rangos de confianza de 95% de la misma. De esta manera se obtiene un gráfico de la distribución espacial de las fracturas naturales. Cuando las mediciones exceden los límites de los rangos de confianza, se interpreta que hay una clusterización o agrupamiento de las fracturas (Marret *et al.* 2017), es decir que su distribución muestra sectores de mayor concentración de fracturas, espaciados por otros con menor presencia de las mismas. En los gráficos de los *sets* NE-SO y NO-SE se detecta la posibilidad de un agrupamiento de fracturas, abarcando un ancho de entre 3 y 10 cm (Fig. 12).

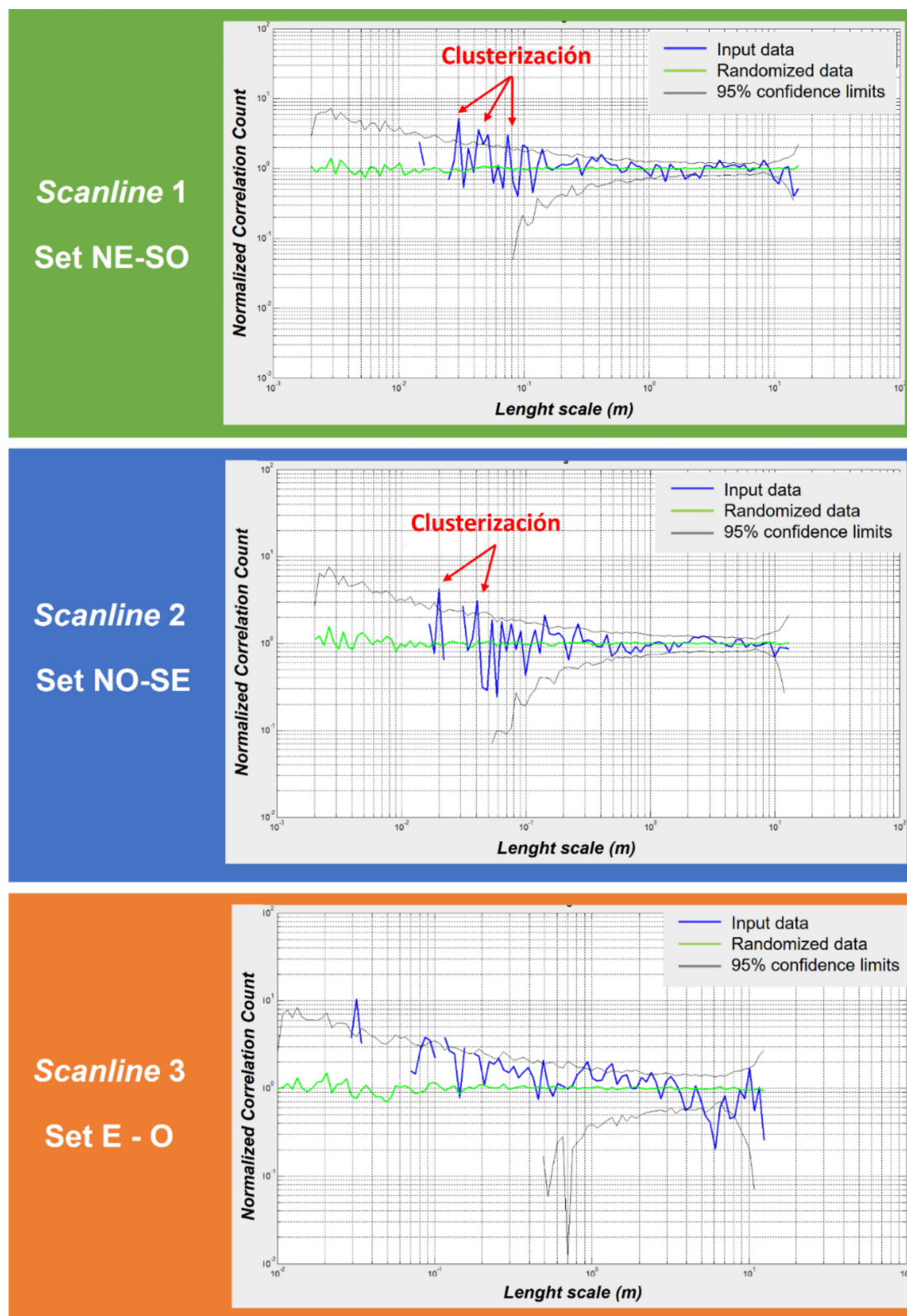


Figura 12. Análisis de distribución espacial de fracturas naturales para cada set identificado, con el método NCC para observar la posible clusterización de fracturas. La línea azul corresponde a los datos de espaciamiento de fracturas naturales medidos, la verde a una distribución aleatoria de los mismos, y las grises a los rangos de confianza de 95% de la aleatoria. La posible clusterización de fracturas es señalada en rojo.

Análisis de mapeo general

Debido a la intensa meteorización observada en los afloramientos, especialmente en los pavimentos de mayor extensión donde se realizaron los *scanlines*, se decidió realizar un mapeo general registrando únicamente las fracturas con cemento. Esta tarea tuvo como objetivo la obtención de datos sobre la apertura cinemática de las fracturas y la cantidad de relleno, versus la porosidad que se podía observar en ellas. Considerando que cuanto más pequeña sea la apertura cinemática de una fractura, más obliterada se encontrará, las mediciones realizadas durante el mapeo se focalizaron en fracturas con aperturas cinemáticas mayores a 1 mm. Es por esta razón que los datos obtenidos poseen un sesgo específico que intenta captar sólo las fracturas relevantes en la porosidad de un reservorio.

Según estos datos, el set con mayor ocurrencia es el E-O, las fracturas más largas son del set NE-SO, las aperturas cinemáticas son de alrededor de los 2 mm, siendo el set de mayor apertura el NO-SE y a su vez, es este mismo set el que presenta una mayor porosidad visual. En este sentido, es importante observar que todos los sets de fracturas presentan tanto fracturas rellenas al 100% como otras con cierto grado de porosidad (Fig. 13).

SET DE FRACTURAS	NE-SO	NO-SE	E-O	N-S
FRACTURAS MEDIDAS	9	14	31	6
LARGO (m)	0.29	0.26	0.21	0.19
APERTURA CINEMÁTICA (mm)	1.70	2.29	1.81	1.28
APRECIACIÓN DE RELLENO (%)	97	88	95	97

Figura 13. Resumen de datos del mapeo general.

A su vez, durante la toma de datos de este mapeo general, se adquirieron 9 muestras orientadas, consideradas representativas para complementar el análisis estadístico. Las muestras fueron estudiadas por el laboratorio LCV S.A. (Valdez 2020), donde se realizaron cortes delgados para la caracterización petrográfica y de microscopía de electrónica de barrido (MEB-EDS). En los mismos se efectuaron observaciones sobre el crecimiento de los cristales, la presencia de porosidad y la secuencia temporal de los eventos de deformación. En general, las muestras presentan roca de caja carbonática con presencia de porosidad secundaria otorgada por las fracturas naturales y en algunos casos también de tipo intercrystalina, móldica e intracemento. Los principales procesos diagenéticos observados incluyen: compactación inicial, recristalización de la matriz, microfracturas, disolución (estilolitas) y óxidos, en el orden mencionado.

La mayoría de las fracturas naturales observadas en las muestras a escala mesoscópica presentan rellenos de calcita con cristales euhedrales en mosaico que indican una cinemática tensional en su generación. Previo a este relleno, en ocasiones pueden observarse al microscopio, sobre la pared de la fractura, cristales criptocristalinos de un evento de cementación previa. En ellas también se

observan importantes aperturas hidráulicas. En las observaciones petrográficas se encontraron varios sistemas de microfracturas, algunas con iguales características que las mesoscópicas (Fig. 14). También se identificaron estilolitas verticales producto de la compresión horizontal. En lo que respecta al análisis puntual de rellenos realizado en MEB-EDS, se observan leves cambios composicionales en los cristales lo que indica la posibilidad de una textura de tipo *Crack and Seal*, evidencia de que la fractura se mantuvo abierta durante varias etapas de cementación.

Es importante destacar que fue en las muestras de campo, tanto a escala meso como microscópica, donde se pudo detectar la presencia de fracturas naturales horizontales con relleno calcítico y porosidad. Desde el punto de vista genético, se las puede interpretar como posteriores a las fracturas verticales, dado que las desplazan. Por otro lado, su presencia y porosidad tienen la capacidad para generar conectividad entre los sistemas de fracturas verticales, mejorando así su potencial comportamiento como reservorio.

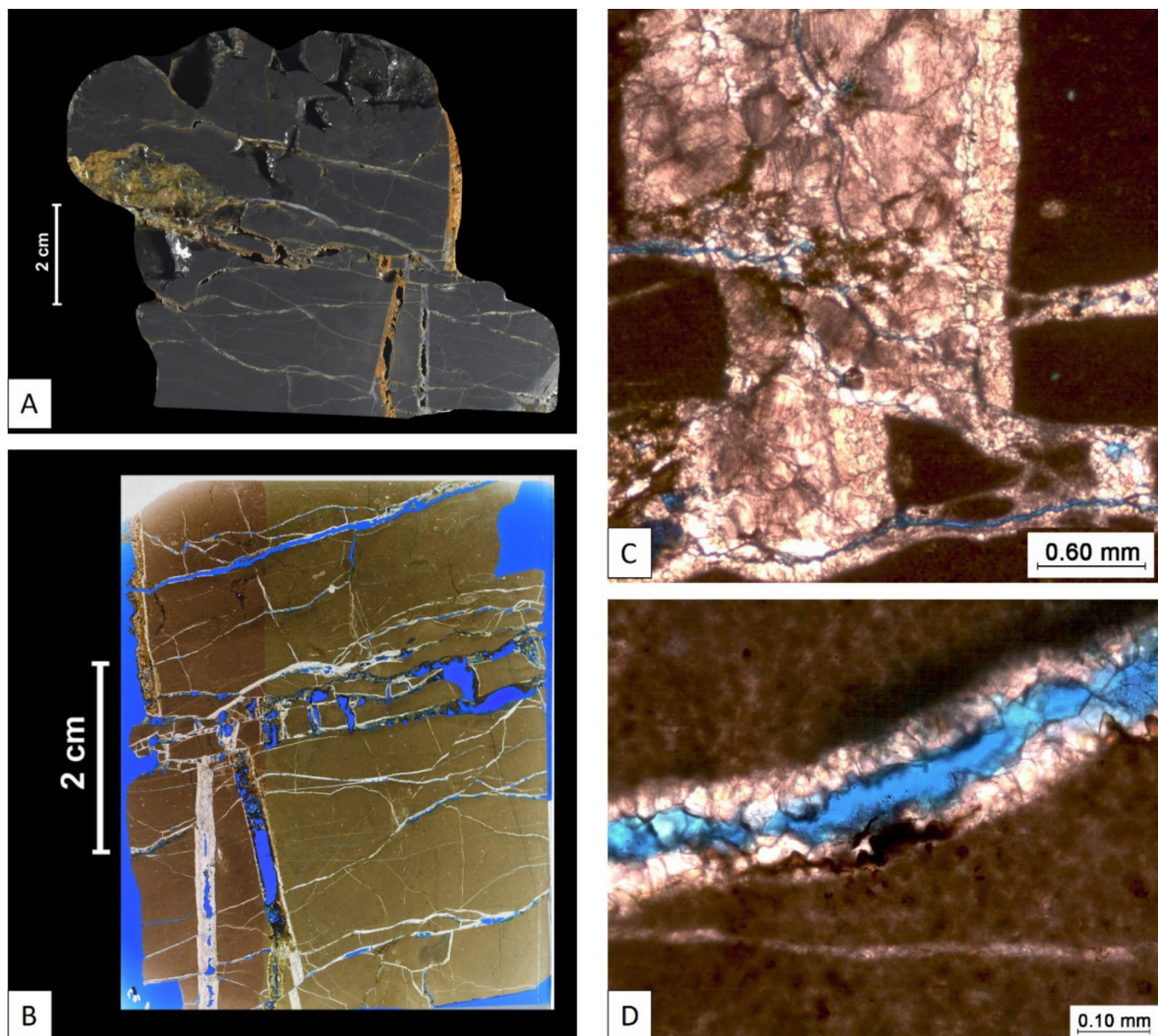


Figura 14. A) Muestra mesoscópica extraída del campo. B) Corte delgado sobredimensionado donde se observan los distintos *sets* de fracturas naturales presentes y las relaciones de corte entre ellos. C) Detalle de los cementos con textura mosaico y el efecto cizalla de las fracturas horizontales. D) Porosidad medida en fracturas (apertura hidráulica).

ESTIMACIÓN VOLUMÉTRICA DEL SISTEMA DE FRACTURAS NATURALES

Con el objetivo de caracterizar el efecto del sistema fracturado en el espacio, se realizó la estimación del volumen que ocupan las fracturas naturales y de porosidad que aportan las mismas. Los datos utilizados para este análisis son tanto de las *scanlines* como del mapeo general, considerando en cada caso cuál de los métodos describía mejor cada dato (Fig. 15).

SCANLINES	FRACTURAS POR METRO SET NE-SO	6.6
	FRACTURAS POR METRO SET NO-SE	8.1
	FRACTURAS POR METRO SET E-O	3.4
	FRACTURAS POR METRO SET N-S *	2
	SUMATORIA INTENSIDAD POR METRO	20.1
MAPEO GENERAL	APERTURA CINEMÁTICA (mm)	1.85
	APRECIACIÓN DE RELLENO (%)	94%

Figura 15. Datos promedio extraídos de los *scanlines* y del mapeo general. *Para el set N-S el valor es aproximado según apreciación en campo, este set no fue medido por ser subordinado a los otros.

De estos cálculos se desprende que el sistema de fracturas naturales representa un 4% del volumen total de roca, indicando una dilatación del sistema como resultado de la deformación. En lo que respecta a la porosidad que aportan las fracturas al volumen total, el valor es del 0,23% (Fig. 16).

P10	Intensidad de fracturas por metro lineal	20
P21	Largo de las fracturas por área. Considerando área unitaria	20
P32	Área de fracturas por unidad de volumen (Las fracturas abarcan todo el banco).	20
Apertura cinemática	Promedio apertura cinemática mapeo general (m)	0.00185
P33	Volumen de fracturas por unidad de volumen (Apertura cinemática * P32).	4%
Porosidad de fracturas	Aporte al volumen de roca total	0.23%

Figura 16. Estimación volumétrica del sistema de fracturas naturales. Intensidad de fracturas según Dershowitz y Herda (1992).

CONCLUSIONES

La disposición estratigráfica y estructural de la Fm. Huitrín en la sierra de Cara Cura es equivalente a la presente en el yacimiento La Ramadita. En lo que respecta a las facies descriptas para cada sector, ambas corresponden a depósitos de plataforma carbonática marginal y presentan espesores similares (observaciones de afloramiento y de perfiles eléctricos de pozos del yacimiento). Paralelamente, ambas zonas comparten la misma historia tectónica en la que los esfuerzos compresivos regionales son responsables de la formación de la faja plegada y corrida. Esta analogía

se encuentra reforzada por la similitud observada en las fracturas descriptas en ambas zonas, especialmente en lo que respecta a la orientación e inclinación de los *sets* de fracturas, y permite extrapolar los datos del afloramiento para la caracterización del sistema de fracturas naturales en el yacimiento. En este sentido, la metodología aplicada para el estudio del afloramiento sirve para conceptualizar la génesis, distribución espacial y evolución temporal de la deformación.

Los estudios descritos en el presente trabajo permitieron conceptualizar el sistema de fracturas naturales para el Mb. La Tosca de la Fm. Huitrín en un contexto estructural complejo. En la interpretación estructural del subsuelo se pueden delinear una serie de corrimientos menores al pie del corrimiento El Sosneado, con el desarrollo de pliegues de baja amplitud involucrando a la Fm. Huitrín. Una situación análoga ocurre en la sierra de Cara Cura, cuyos afloramientos constituyen un excelente análogo superficial para mejorar la comprensión de aquellas estructuras que se encuentran soterradas en otras posiciones de la cuenca.

Los datos del yacimiento La Ramadita indican la presencia de un sistema de fracturas principalmente verticales, con *sets* en un amplio rango de orientaciones y con porosidad llena de calcita e hidrocarburos. Debido a la distribución puntual de estos datos, resultó fundamental el estudio de un afloramiento análogo para mejorar así la comprensión del sistema de fracturas, especialmente de la distribución espacial del mismo.

El estudio del afloramiento de la Fm. Huitrín en sierra de Cara Cura permitió la relevar las siguientes características principales de las fracturas naturales: orientación, relación con la estratificación, tipos de relleno, texturas, porosidad, longitud y distribución en *clusters*.

Además, las observaciones petrográficas de muestras de afloramiento ayudaron a visualizar los diferentes eventos de cementación, las relaciones de corte entre los distintos *sets*, e incluso mostraron un sistema de fracturas naturales paralelas a la estratificación con cemento de calcita y desplazamiento por cortante de los conjuntos verticales que no se había visualizado en el afloramiento. Estas características indican que las fracturas naturales son de origen tectónico, posiblemente con una primera etapa de deformación previa al plegamiento, en donde se forman las distintas familias de fracturas verticales respecto a la estratificación (relaciones de corte mutuas) y una etapa posterior, en la que se generan las fracturas paralelas a la estratificación que desplazan a las anteriores.

Con base en esta analogía, se utilizaron datos de afloramientos para estimar la porosidad que aportan las fracturas al reservorio. En un futuro, el estudio de los afloramientos podría extenderse a diferentes posiciones con respecto a las principales fallas y anticlinales de la sierra de Cara Cura para detectar variaciones en la red de fracturas naturales. Asimismo, el estudio de las inclusiones fluidas en los cementos podría brindar información sobre la cronología de cada evento de deformación responsable de generar fracturas naturales.

Este tipo de estudio representa una oportunidad única para el análisis del sistema fracturado y resulta imprescindible para la mejor caracterización del reservorio y de los posibles prospectos exploratorios relacionados

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF por la posibilidad de presentar este trabajo y a los revisores y colegas que colaboraron al enriquecimiento del mismo.

REFERENCIAS CITADAS

- Bande, A., A. Boll, F. Fuentes, B.K. Horton, and D.F. Stockli. 2020. Thermochronological constraints on the exhumation of the Malargüe fold-thrust belt, southern central Andes. In: *Opening and closure of the Neuquén basin in the southern Andes*, ed. D. Kietzman, A. Folguera, Springer Earth System Sciences.
- Bechis, F., Cristallini, E., Giambiagi, L. Yagupsky, D.L., Guzmán, C. G. y García, V.H., 2014. Trans-tensional tectonics induced by oblique reactivation of previous lithospheric anisotropies during the Late Triassic to Early Jurassic rifting in the Neuquén basin: insights from analog models. *Journal of Geodynamics* 79:1–17.
- Bechis, F., Giambiagi, L. B., Tunik, M. A., Suriano, J., Lanés, S., and Mescua, J., 2020. Tectono-stratigraphic evolution of the Atuel depocenter during the Late Triassic to Early Jurassic rift stage, Neuquén basin, west-central Argentina. In: Kietzman D. Folguera, A. (Eds), *Opening and closure of the Neuquén basin in the southern Andes*. Springer Earth System Sciences.
- Brisson, I., Veiga, R., 1999. Gira de Campo, Cuenca Neuquina. YPF. Unpublished.
- Dershowitz, W., Herda, H. 1992. Interpretation of fractur spacing and intensity. ARMA 1992.
- Fuentes, F., B.K. Horton, D. Starck, and A. Boll. 2016. Structure and tectonic evolution of hybrid thick- and thin-skinned systems in the Malargüe fold-thrust belt, Neuquén basin, Argentina. *Geological Magazine* 153: 1066–1084.
- Giambiagi, L.B., Bechis, F., García, V.H., and Clark, A.H., 2008a. Temporal and spatial relationships of thick- and thin-skinned deformation: a case study from the Malargüe fold-and-thrust belt, southern Central Andes. *Tectonophysics* 459, 123–139.
- Giambiagi, L.B., Bechis, F., Lanés, S., Tunik, M., García, V., Suriano, J., Mescua, J., 2008b. Formación y evolución triásico-jurásica del depocentro Atuel, cuenca Neuquina, provincia de Mendoza, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (4): 520-533.
- Groeber, P. 1946. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. 1 Hoja Chos Malal. Sociedad Geológica Argentina, Revista 1 (3): 117-208.
- Kozlowski, E., Manceda, R., Ramos, V.A., 1993. Estructura. En: Ramos, V. (Ed.), *Geología y recursos naturales de Mendoza*, Relatorio. 12° Cong. Geol. Argentino y 2° Cong. Explor. Hidrocarburos, pp. 235–256.
- Legarreta, L. 1985. Análisis estratigráfico de la Formación Huitrín (Cretácico inferior), Provincia de Mendoza. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Tesis Doctoral: 197 pp. (inédito).
- Legarreta, L., Gulisiano, C., Uliana M.A. 1993. Las secuencias sedimentarias jurásico-cretácicas. 12° Congreso Geológico Argentino, Relatorio 1 (9): 87-114.

- López R., Ruiz R., Spacapan J., Hryb D., Manceda R., Santiago E., Montagna A., 2018. Por qué y cómo hacer un modelo conceptual de Fracturas Naturales. El ejemplo de la Fm Cupén Mahuida. 10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina.
- López, R., García, M., D'Elia, L., Bilmes, A., Otalora, N., Tettamanti, M., Buchanan, G., Hryb, D., De Simone, H., Montagna, A., Corbera, R., 2022. Análisis multiescalar de fracturas naturales en afloramiento y su utilización como análogo en la construcción del modelo 3D de subsuelo, el caso de Cerro Granito y Yacimiento Campamento 1, Cuenca Neuquina. En este congreso.
- López Ordines, A., L. Ciancio, E.A. Rojas Vera, R.G. López. 2022. Structural development in the frontal Malargüe fold and thrust belt, Neuquén Basin, Argentina. Andean structural styles. Elsevier.
- Manceda, R, and D. Figueroa. 1995. Inversion of the Mesozoic Neuquén rift in the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. In: Petroleum basins of South America, ed. Tankard A.J., R. Suárez and H.J. Welsink, AAPG Memoir 62: 369–382.
- Marrett, R., *et al.*, 2017. Correlation analysis of fracture arrangement in space, Journal of Structural Geology.
- Nelson, R.A. 2001. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. 2nd ed. United States of America. Gulf Professional Publishing.
- Rojas Vera, E. A. Mescua, J. Folguera, A., Becker, T. P., Sagripanti, L., Fenell, L., Orts, D.L., Ramos, V.A., 2015. Evolution of the Chos Malal and Agrio fold and thrust belts, Andes of Neuquén: Insights from structural analysis and apatite fission track dating. Journal of South American Earth Sciences (64) 418–433.
- Valdez, A. 2020. Muestras de superficie Formación Huitrín, Mb. La Tosca: Estudio petrográfico y de MEB. LCV S.A.
- Ukar, E., S.E. Laubach and J.N. Hooker. 2019. Outcrops as guides to subsurface natural fractures: Example from the Nikanassin Formation tight-gas sandstone, Grande Cache, Alberta foothills, Canada. Marine and Petroleum Geology 103: 255-275.

