

# Estructuras tectónicas y cementos asociados en la Formación Los Molles, Chacay Melehue, Neuquén: su importancia en el entendimiento de la migración de hidrocarburos

Natalia FORTUNATTI<sup>1</sup> y Ana Laura RAINOLDI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

<sup>2</sup> Centro Patagónico de Estudios Metalogenéticos, CONICET, Bahía Blanca.

E-mail: nfortuna@uns.edu.ar

Editores invitados: Mariano Larrovere, Pablo Alasino y Sebastián Rocher

## RESUMEN

En esta contribución se analizan estructuras tectónicas y cementos asociados en la Formación Los Molles (Pliensbachiano-Toarciano, Grupo Cuyo) en su localidad tipo de Chacay Melehue, faja plegada y corrida de Chos Malal, Neuquén. Se identificaron tres grupos de estructuras tectónicas de acuerdo a su cinemática, orientación y características del cemento: i) fallas buzantes al SO y E-SE, con cemento con crecimiento sintaxial y texturas *blocky* o texturas cristalinas tipo *stretched*; ii) fracturas de alto ángulo respecto a la estratificación o discordantes, con crecimiento sintaxial y texturas *blocky* o cementación multiepisódica *crack-seal* y cristales tipo *stretched*, y iii) fracturas concordantes respecto a la estratificación, con crecimiento sincinemático tipo *stretching* o con crecimiento antitaxial multiepisódico con texturas cristalinas fibrosas, asociadas o no a procesos de disolución. El estudio de catodoluminiscencia y fluorescencia de las inclusiones fluidas alojadas en los cementos permitió identificar un primer evento de expulsión de hidrocarburos líquidos (fluorescencia amarilla) y un segundo evento de expulsión de hidrocarburos gaseosos (fluorescencia celeste) que utilizaron zonas de permeabilidad vinculadas a la deformación tectónica. Estos eventos de migración de fluidos estarían asociados a los distintos estadios de exhumación de la Orogenia Andina, establecidos para la zona en el Cretácico Tardío y Mioceno, respectivamente.

**Palabras clave:** *Orogenia Andina, fallas, fracturación estratigráfica, texturas cristalinas, inclusiones fluidas.*

## ABSTRACT

*Tectonic features and infilling minerals from Los Molles Formation, Chacay Melehue, Neuquén: its importance in the understanding of hydrocarbons migration.*

The tectonic features and infilling minerals from Los Molles Formation (Pliensbachian-Toarcian, Cuyo Group) from Chacay Melehue, Chos Malal fold and thrust belt, Neuquén province, were analyzed in this contribution. Three types of tectonic structures were identified according to the kinematic and mineralization characteristics: i) SW and E/SE dipping faults, with syntaxial growth and blocky texture or with stretched crystals development; ii) high-angle fractures respect layering, with syntaxial growth and blocky texture or crack-seal veins with stretching texture and, iii) bed-parallel low-angle fractures showing synkinematic growth with stretched crystals or multiepisodic antitaxial growth and fibrous texture with or without dissolution features. Cathodoluminescence and fluorescence studies in cements and fluid inclusions allowed to identify a first event of oil expulsion (fluid inclusions with yellow fluorescence) and a second event of dry gas expulsion (fluid inclusions with light-blue fluorescence), favored by permeability related to tectonic deformation. The fluid migration events would be related to tectonic driven exhumation stages of Andean Orogeny, established in the study area for Late Cretaceous and Miocene, respectively.

**Keywords:** *Andean Orogeny, faults, fracture stratigraphy, crystalline texture, fluid inclusions.*

## INTRODUCCIÓN

Los ambientes tectónicos de faja plegada y corrida involucran, de manera generalizada, la deformación de secuencias sedimentarias en su historia cinemática. La reología de los distintos tipos litológicos que participan en una determinada columna estratigráfica posee un papel trascendental en la construcción de los orógenos (Morley *et al.* 2017). Las secuencias rocosas, de origen silicoclástico, carbonático o mixto, registran el relleno de cuencas sedimentarias que comúnmente se apoyan sobre basamentos cristalinos ígneos o metamórficos. El estudio de la cinemática (geometría y evolución temporal) de las estructuras tectónicas que afectan estas secuencias es posible cuando las distintas litologías permiten registrar la deformación a través de fallas, pliegues y fracturación asociada; de esta manera, es posible su caracterización a distintas escalas, desde secciones sísmicas hasta análisis al microscopio y el posterior desarrollo de modelos predictivos. En este contexto, el estudio de rocas fangolíticas deformadas tectónicamente conlleva una particular dificultad, asociada a su complejo comportamiento reológico (Morley *et al.* 2017).

Las rocas de grano muy fino (fango <64  $\mu\text{m}$ ) ocupan en volumen un porcentaje importante en los registros sedimentarios de relleno de cuenca. Su comportamiento ante la deformación reviste particular dificultad debido a su mineralogía, ordenamiento espacial, evolución diagenética y vinculación con condiciones de presión de fluidos anómalas (Tissot y Welte 1984, Morley *et al.* 2017). Son escasos los afloramientos de buena calidad que permitan documentar su comportamiento en ambientes compresivos de fajas plegadas y corridas. Aspectos claves como la geometría, el espesor y las estructuras asociadas a las zonas de despegue, el comportamiento mecánico de la roca y la influencia de los procesos diagenéticos en el mismo, entre otros, constituyen actualmente fuente de interés y estudio. Estos aspectos contribuyen al entendimiento de la participación de este tipo de litologías en el desarrollo arquitectural a distinta escala de los orógenos y en los últimos años, a la exploración y desarrollo de recursos no

convencionales como lo constituyen los *shale oil/shale gas*.

La evolución en el conocimiento de reservorios no convencionales tipo *shale oil/shale gas* ha avanzado en función del aumento en las reservas mundiales de petróleo y gas vinculado a los mismos (Jarvie 2012, Holdchit 2013). Líneas de trabajo con diferentes técnicas analíticas y a distintas escalas geológicas constituyen el enfoque adecuado para resolver aspectos asociados a la exploración y explotación de este tipo de yacimientos (Slatt *et al.* 2012). El conocimiento de la geomecánica y fracturación natural es necesario en la diagramación y ejecución de operaciones de estimulación hidráulica (Gale *et al.* 2007, 2014), para lo cual el estudio de afloramientos constituye una herramienta de importancia. La evaluación de los atributos de la fracturación, su temporalidad (Ghosh *et al.* 2018) y fracturación estratigráfica (Laubach *et al.* 2009, Gale *et al.* 2014) permite, además, determinar la participación de los distintos niveles fangolíticos como vías favorables de migración de fluidos junto con la predicción en subsuelo de la permeabilidad de la roca o su capacidad de almacenamiento (Gale *et al.* 2007, 2014). Las características de los atributos poseen una génesis compleja, aunque es posible encontrar patrones de fracturas y texturas de cementación comunes. El estudio en detalle de las fracturas y sus cementos es clave en el entendimiento de la historia geológica de los procesos y fluidos que interactuaron durante el desarrollo de los reservorios no convencionales tipo shale (Passchier y Trouw 2005, Bons *et al.* 2012, Gale *et al.* 2014).

La Formación Los Molles representa una de las rocas generadoras y reservorio no convencional *shale-gas* más importante de Argentina. Uliana *et al.* (2014) describe su potencial asociado a variaciones del nivel eustático dentro del ámbito de la cuenca Neuquina, en respuesta a fenómenos globales de aumento y descenso del nivel medio del mar. Las condiciones de máxima inundación dan lugar al aporte de querógeno tipo II/III y valores de carbono orgánico total (COT) de entre 1 y 3%. La maduración de la Formación Los Molles la ubica como roca madre de petróleos predominantemente parafínicos con importantes volúmenes de gas generados

en los sectores de mayor soterramiento. De acuerdo a Chebli *et al.* (2011), existen buenas posibilidades para considerar a esta unidad como reservorio no convencional en relación a la cantidad de materia orgánica y madurez térmica que posee, siendo factores limitantes la profundidad de la formación y su espesor por su irregular distribución en subsuelo. Jorgensen *et al.* (2013) concluyen, de acuerdo al análisis de los parámetros básicos (COT, presión en subsuelo, espesor), que la Formación Los Molles cumple con las condiciones adecuadas para constituirse en un reservorio no convencional tipo *shale-gas*, siendo importante integrar nueva información para avanzar en su conocimiento. Rainoldi *et al.* (2016, 2017) y Fortunatti y Rainoldi (2018) realizaron nuevos aportes acerca de la evolución diagenética de la Formación Los Molles, con énfasis en la determinación de la generación y *timing* de expulsión de los hidrocarburos.

El objetivo de este estudio es describir y caracterizar las estructuras tectónicas relevadas en la Formación Los Molles, a través del estudio meso y microscópico de los cementos asociados a las mismas, combinando técnicas de petrografía y luminiscencia (fluorescencia y catodoluminiscencia). Se busca aportar nuevos datos acerca del mecanismo de deformación presente en la secuencia fangolítica-carbonática, su relación con la migración de fluidos diagenéticos y la temporalidad de expulsión de los hidrocarburos respecto a la secuencia evolutiva de la deformación.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra localizada en la Cordillera del Viento, en cercanías a la localidad de Chos Malal (Neuquén), en inmediaciones del paraje Chacay Melehue donde afloramientos de Formación Los Molles constituyen el perfil tipo para esta unidad (Fig. 1). La cuenca Neuquina se extiende en la porción centro occidental de Argentina desde los 33° a los 41° de latitud sur y desde los 67° a los 72° de longitud oeste (Fig. 1a). Su génesis se vincula a la tectónica extensional instalada en este sector de Gondwana para el Triásico Tardío-Jurásico Temprano, dando lugar al desarrollo aislado de hemigrábenos con

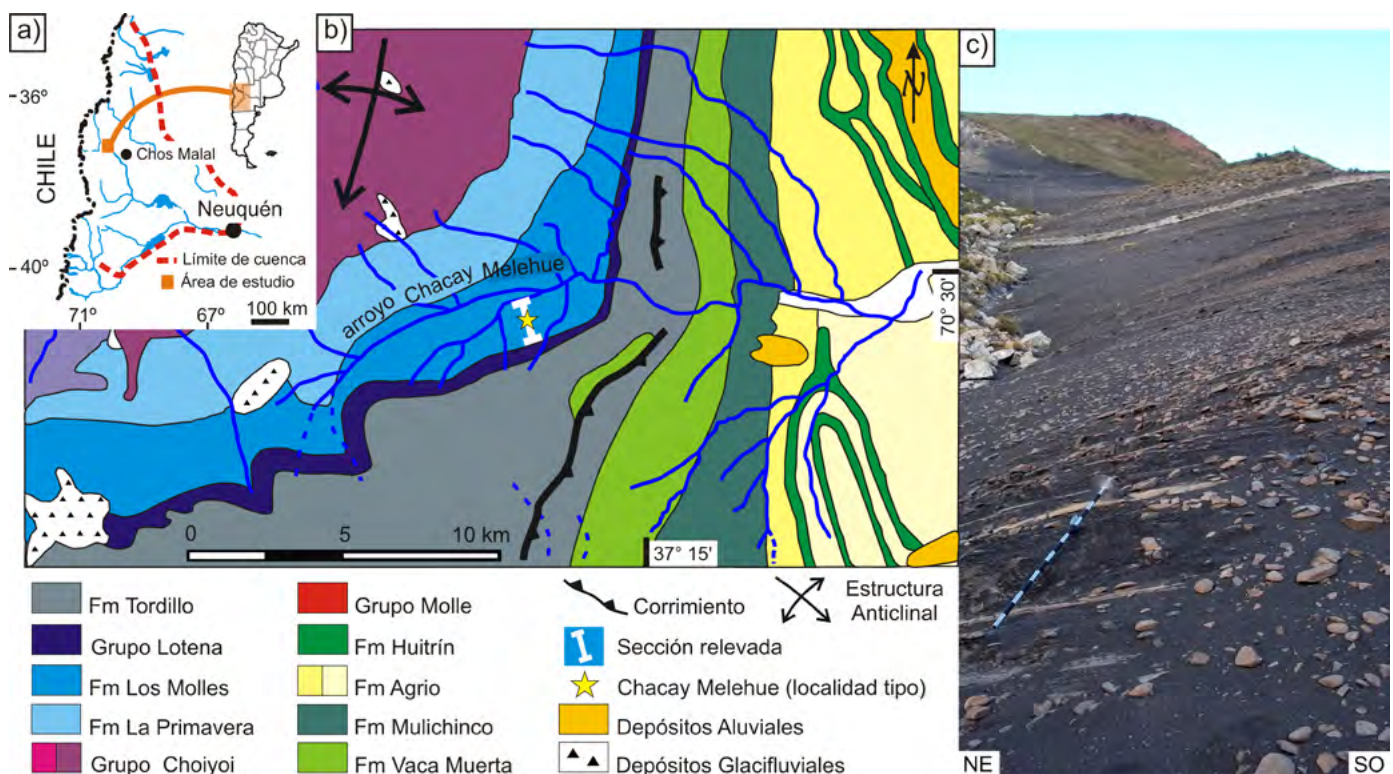
orientación noroeste-sureste y la subsecuente depositación controlada tectónicamente (Vergani *et al.* 1995). A principios del Jurásico, la convergencia de placas y subducción asociada con desarrollo de un arco magmático al oeste del depocentro, condicionó en gran medida la evolución geológica de la cuenca. Durante el Jurásico y Cretácico se desarrolló un esquema de cuenca de trasarco parcialmente cerrado, en el cuál el arco actuó como umbral controlando las variaciones de nivel de base y el desarrollo de mares relativamente profundos (Legarreta *et al.* 2005). Esta evolución tectónica se ve reflejada en el registro estratigráfico de la cuenca con la depositación de rocas madre, reservorio y sello (Legarreta *et al.* 2005). El relleno sedimentario de la cuenca fue afectado por la deformación contraccional Andina desde el Cretácico Tardío, a partir del cual se construyó el relieve orogénico a lo largo del límite occidental (Tunik *et al.* 2010, Di Giulio *et al.* 2012).

La Cordillera del Viento constituye un braquianticinal que expone en su núcleo rocas sedimentarias, plutónicas y volcánicas del Paleozoico superior (Grupo Choiyoi)

cubiertas por la secuencia jurásica-cretácica, compuesta por los grupos Cuyo (Formaciones La Primavera, Los Molles y Tábanos), Lotena y Mendoza (Formaciones Tordillo, Vaca Muerta, Mulichinco y Agrio) (Fig. 1b) (Gulisano y Gutierrez Pleimling 1994, Llambías *et al.* 2007). En relación a su configuración tectónica, se ubica en el extremo sur de los Andes Centrales, provincia de Neuquén, ámbito denominado faja plegada y corrida de Chos Malal. En este sector se definen dos estadios de deformación de acuerdo a Sánchez *et al.* (2018): el primero involucra al basamento a través de inversión de fallas preexistentes y activación de sistemas de retrocorrimientos dando lugar a la elevación del flanco oeste de la Cordillera del Viento; y un segundo, durante el Mioceno medio, que afecta nuevamente el sector interior de la faja plegada y corrida Chos Malal a través de la generación de estructuras de piel fina en la cubierta sedimentaria.

La sección estratigráfica de la zona de estudio está representada por un importante registro de depósitos epiclásticos y piroclásticos correspondientes al Grupo Choiyoi seguidos por aproximadamente 850 m

de fangolitas y calizas oscuras intercaladas con areniscas grises muy claras de espesor variable (< 1 m) de la Formación Los Molles (Fig. 1c) (Gulisano y Gutierrez Pleimling 1994). La Formación Los Molles (Pliensbachiano-Toarciario), perteneciente al Grupo Cuyo (Sinemuriano-Calloviano medio), es el ciclo que registra el primer gran evento de transgresión marina de la cuenca Neuquina y que constituye un sistema petrolero completo (Arregui *et al.* 2011). La Formación Los Molles posee una amplia distribución geográfica tanto en afloramiento como en subsuelo y espesores que alcanzan hasta los 2000 m. Está compuesta por pelitas negras-gris oscuras con contenido orgánico variable que alternan con areniscas finas hasta gruesas y conglomerados (Arregui *et al.* 2011). Su contenido fosilífero (restos vegetales, fauna y microfósiles) indican una edad aaleniana-calloviana y permite asignarle un ambiente de sedimentación marina de baja energía, que intercala con flujos de alta densidad de mayor granulometría y facies progresivamente más jóvenes hacia el noroeste de la provincia de Neuquén (Arregui *et al.* 2011). La colum-



**Figura 1.** a) Ubicación geográfica de la cuenca Neuquina y sector que comprende la localidad de estudio. b) Mapa geológico de la Cordillera del Viento mostrando Chacay Melehue, localidad tipo de la Formación Los Molles (perfil marcado en línea blanca sobre el mapa). Debido a la escala del mapa no pudieron ser incluidos los afloramientos de la Formación Tábanos. c) Vista del afloramiento de la Formación Los Molles desde la base del perfil relevado.

na registra en este sector de la cuenca la evolución desde la base de un ambiente de plataforma con aumento de la columna de agua e inmersión generalizada al tope y desarrollo esporádico de turbiditas. Los depósitos evaporíticos indican una rápida somerización a fines del Calloviano en un ambiente marino hipersalino con exposición subaérea episódica (Gulisano y Gutierrez Pleimling 1994).

## METODOLOGÍA

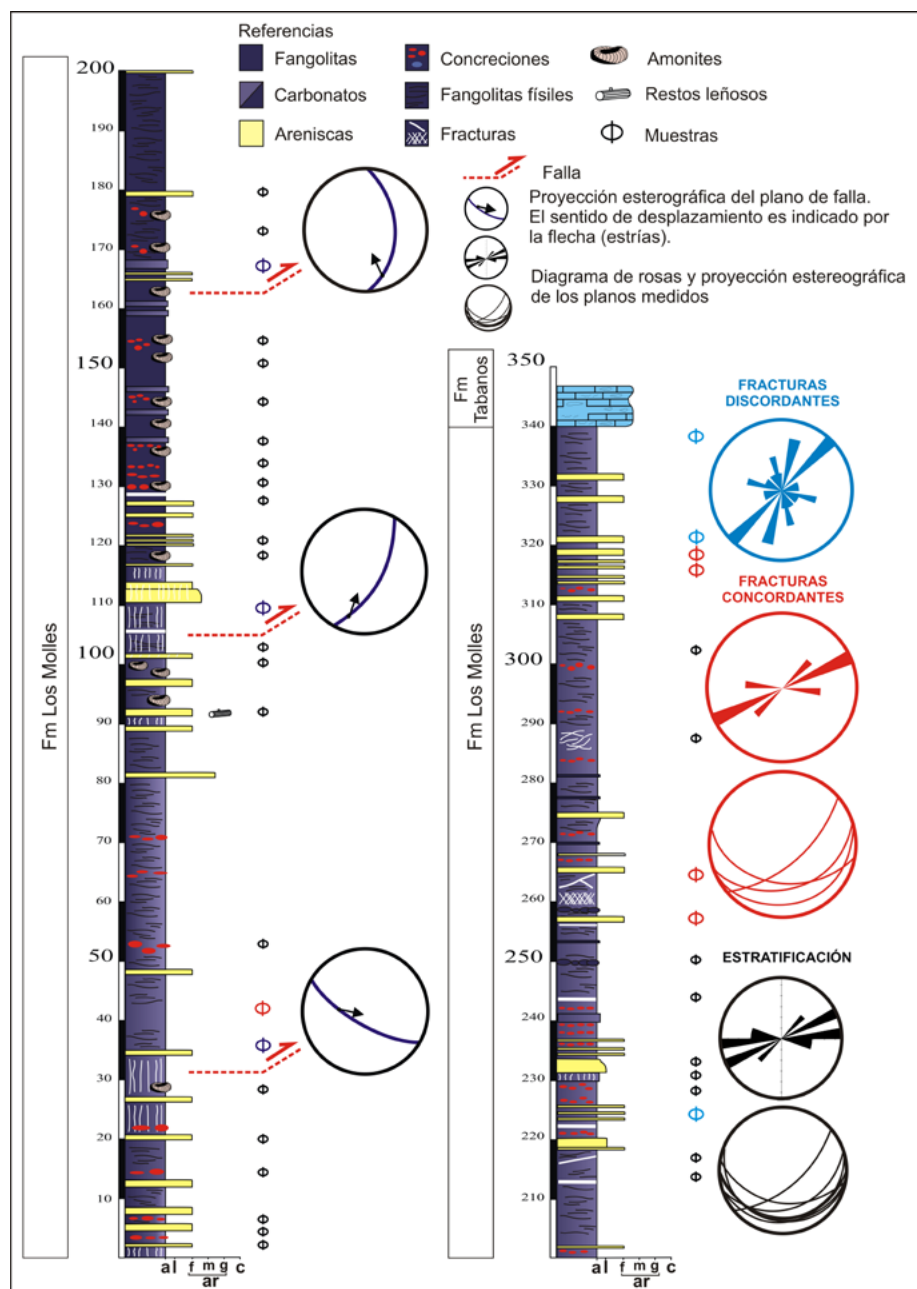
Se releva el perfil perteneciente a la Formación Los Molles en Chacay Melehue. El espesor de la secuencia se midió con báculo de Jacob. Se tomaron puntos de control con GPS Garmin Etrex en localidades de muestreo de roca y presencia de estructuras tectónicas cementadas. Se midió con brújula Brunton estratificación, fracturas y fallas (rumbo y ángulo de buzamiento). Se tomaron muestras orientadas de acuerdo a Passchier y Trouw (2005). Los cortes petro-calcográficos se elaboraron en el Laboratorio de Petrotomía del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y su análisis mesoscópico se realizó con una lupa Leica MZ95 con modo de polarización. Los estudios petrográficos, de inclusiones fluidas y de catodoluminiscencia se concretaron en el Laboratorio de Luminiscencia del Departamento de Geología de la UNS con un microscopio Nikon Eclipse 50iPol de polarización y epifluorescencia, con platina de catodoluminiscencia anexada MK5-2 (CITL CL5) anexada. Se identificaron hidrocarburos entrampados en inclusiones fluidas con microscopía de transmisión y fluorescencia. El estudio de las inclusiones fluidas se hizo en base a asociaciones de inclusiones fluidas (AIF) siguiendo el criterio de Goldstein y Reynolds (1994). Solamente en aquellos casos donde no se observaron AIF, los estudios se realizaron en inclusiones fluidas aisladas. La presencia de moléculas aromáticas como una de las fases en el/los fluidos, pudo ser identificada siguiendo el criterio de Burruss (1981). La composición del hidrocarburo se identificó en base a su color de fluorescencia de acuerdo a Riecker (1962): los compuestos más livianos (alta gravedad API) emiten fluorescencia en longitudes

de onda más corta y los de base asfáltica (baja gravedad API) en longitudes de onda más larga; de este modo, de acuerdo a la fluorescencia emitida i) color azul indica la presencia de hidrocarburos livianos, ii) color amarillo-verde indica hidrocarburos pesados a intermedios y iii) color rojo indica hidrocarburos crudos pesados a muy pesados.

## RESULTADOS

### Perfil estratigráfico

Se relevaron 340 m de la secuencia fangolítica-carbonática de la Formación Los Molles en su perfil tipo de Chacay Melehue (Fig. 2). A escala de afloramiento la Formación Los Molles está representada por una monótona secuencia de fangolitas con intercalaciones menores de areniscas y abundantes concreciones y amonoides.



**Figura 2.** Perfil relevado para la Formación Los Molles en la localidad tipo de Chacay Melehue. Los datos de rumbo y buzamiento de la estratificación y estructuras tectónicas se muestran en proyección estereográfica (red de Schmidt) y diagrama de rosas: negro=estratificación; violeta=planos de falla, con dirección de desplazamiento indicado con flechas sobre la proyección; celeste=fracturas discordantes y rojo=fracturas concordantes, ambos planos respecto a la estratificación.

Con un detallado estudio de microfacies, se pudo determinar una asociación de facies mucho más compleja con presencia de fangolitas negras, de notoria predominancia en la base, *mudstones*, *wackestones* bioclásticos y areniscas tobáceas con importante participación de concreciones, éstas últimas representadas por *wackestones* bioclásticos y *wackestones* peloidales. La asociación de estas estructuras diagenéticas con el hallazgo *in situ* de restos orgánicos fosilizados, tanto acuáticos (amonites) como continentales (material leñoso), es notable. La complejidad de relevar la columna debido a su ritmicidad y homogeneidad se vio favorecida por la presencia y la tonalidad contrastante de las psamitas, utilizadas como niveles guía y puntos de control estratégicos. Estos niveles psamíticos están constituidos por areniscas de grano fino/medio y en menor medida gruesos, bien seleccionadas, con una fuerte impronta volcanoclástica, conformadas por clastos de fragmentos líticos volcánicos y volcanoclásticos y matriz tobácea; se encuentran fuertemente alteradas (argilizadas).

La secuencia sedimentaria relevada presenta un buzamiento general con ángulo variable entre 15° y 45° al SE (Fig. 2). Se identificaron distintos rasgos tectónicos, siendo la fracturación estratigráfica un rasgo conspicuo que facilitó la discriminación de facies fangolíticas (con poca o nula expresión de las fracturas, caracterizadas por malos afloramientos y presencia de derrubio) de aquellas facies con mayor participación carbonática o calizas (con buena expresión de la fracturación) (Fig. 3).

### Rasgos tectónicos

Los distintos rasgos tectónicos reconocidos pueden discriminarse de acuerdo a su cinemática y orientación en tres grupos: 1) fallas, aquellos planos discordantes que muestran desplazamiento de la estratificación como referencia, 2) fracturas en alto ángulo respecto a la estratificación o discordantes, y 3) fracturas con orientación similar a la estratificación o concordantes. Se brinda a continuación la descripción a escala de afloramiento, meso y microscópica de cada grupo, incluyendo los cementos presentes.

1) *Fallas*: Se reconocieron cementos en

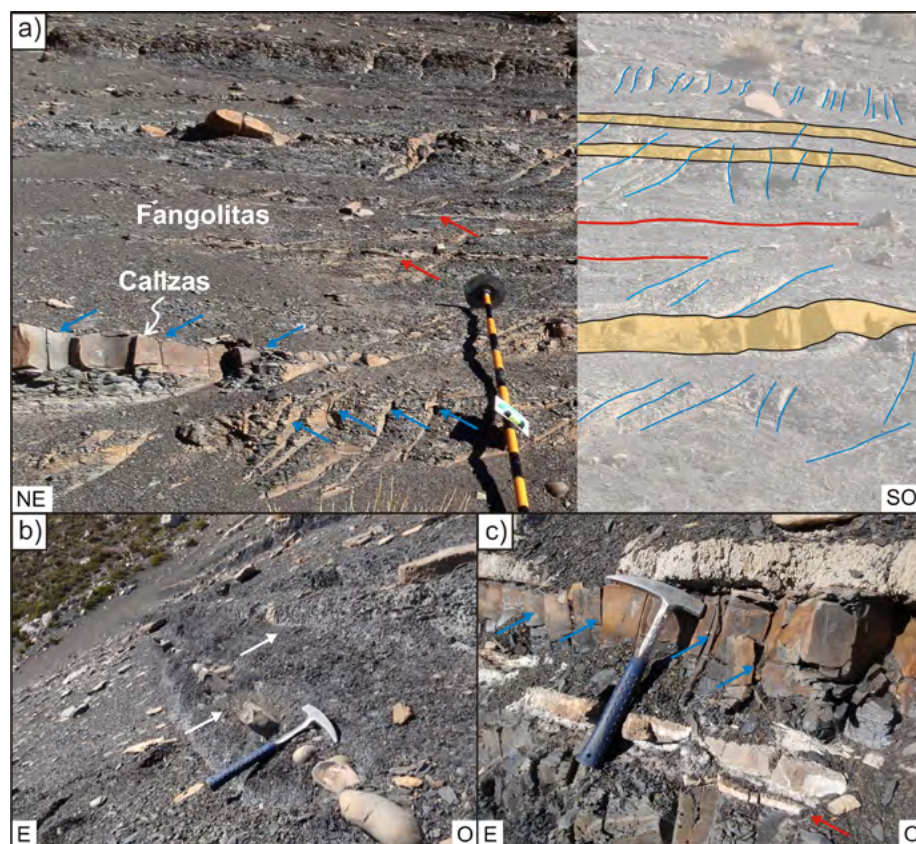
planos discordantes de orientación espacial variable (planos buzantes al SO y al E/SE) que afectan a la secuencia mediante su desplazamiento en distintos sectores del perfil (Fig. 2). La presencia de niveles psamíticos de coloración contrastante con las fangolitas ha permitido notar desplazamientos del orden métrico para las fallas buzantes al E/SE. En el caso de las estructuras buzantes al SO no ha sido posible identificar la trayectoria del plano de falla como llano y ubicar puntos de control para poder lograr una reconstrucción retrodeformable en este sector.

1.1. *Fallas buzantes al SO*: A los 35 m desde la base del perfil relevado se observa un plano discordante N120°/65°SO (Fig. 4a), con dirección de desplazamiento en sentido O/E. La presencia de cemento carbonático facilita su reconocimiento, siendo el espesor del material cementante variable, alcanzando entre 5 y 8 cm como máximo (Fig. 4b).

El estudio a escala microscópica muestra

fragmentos de la roca de caja cementados con cristales de calcita de gran tamaño (~2,5mm) con textura *blocky* (CalB<sub>1</sub>) y planos de estilolitización subparalelos a la falla (Fig. 5). El límite de la mineralización en la falla con los bloques colgante y yaciente muestra zonas con los cristales CalB<sub>1</sub> aplanados y desarrollo de superficies estilolíticas impregnadas con bitumen (Figs. 5a y b). CalB<sub>1</sub> presenta luminiscencia moderada a intensa, color rojo (Figs. 5c y d) y aloja inclusiones fluidas orgánicas, monofásicas, de origen pseudosecundario, dispuestas en alineaciones según planos de clivaje y emiten fluorescencia color amarilla bajo luz ultravioleta. Se reconocen cristales de cuarzo diagenético, sin luminiscencia, sobre el plano de estilolitización (Fig. 5c) como así también en zonas de disolución.

Microfracturas verticales respecto al plano de falla, rellenas con calcita con textura *blocky* (CalB<sub>2</sub>), se presentan discordantes respecto a CalB<sub>1</sub> (Figs. 5a y b). CalB<sub>2</sub> es

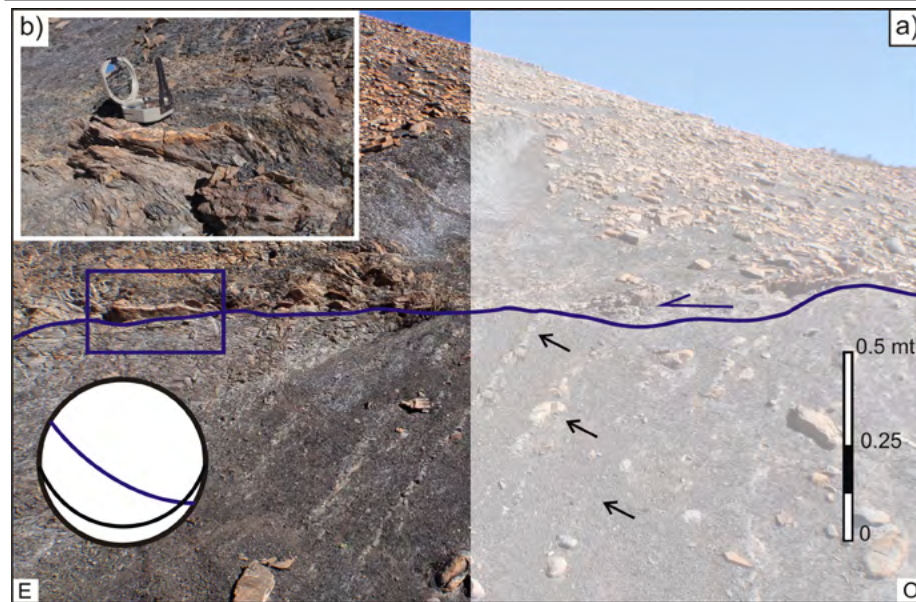


**Figura 3.** Fracturación estratigráfica presente en el perfil relevado para la Formación Los Molles. a) Las flechas celestes indican fracturación discordante y las rojas, concordante respecto a la estratificación. Nótese la deformación frágil de los estratos carbonáticos respecto a las fangolitas. b) Nulo desarrollo de fracturas discordantes en fangolitas. Obsérvese las concreciones alineadas sobre el plano de laminación primaria, indicado por flechas blancas. c) Detalle mostrando fracturación discordante en niveles frágiles (flechas celestes) y presencia de venillas concordantes a la estratificación en contactos litológicos (flechas rojas).

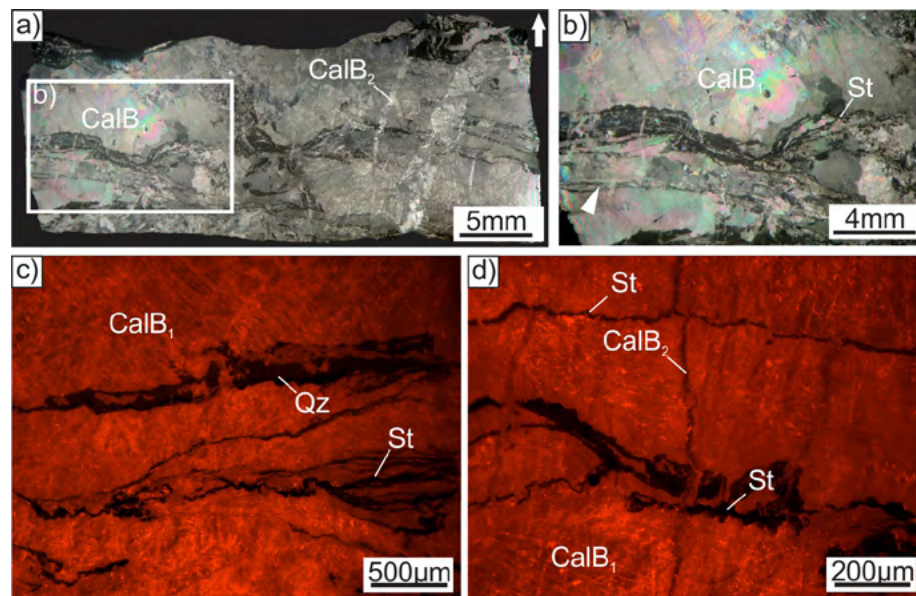
de grano fino (<450  $\mu\text{m}$ ), límpida y presenta luminiscencia débil color rojo (Fig. 5d). Las microfracturas cortan a las estilolitas y en ocasiones es posible observar relaciones de corte opuestas (microfracturas cortadas por estilolitización) (Fig. 5d).

**1.2. Fallas buzantes al E/SE:** A los 105 metros y a los 165 m del perfil se relevaron cementos asociados a planos discordantes respecto a la estratificación con orientación NNE y buzamiento variable al E/SE (Fig. 6a), con dirección de desplazamiento real SE/NO ( $201^\circ/70^\circ$ ) o SO/NE ( $160^\circ/30^\circ$ ) en cada caso, medido a partir de estrías en el plano de falla. El cemento mineralizante es carbonático, posee espesores variables, que no superan los 10 cm, presenta crecimiento sincinemático (Fig. 6b) aunque localmente pueden dar lugar a la generación de cataclasitas (Figs. 6c y d). Existen diferencias texturales debido al espacio disponible para la precipitación del material cementante. Se observaron dos tipos de relleno: i) cristales de calcita con textura *stretched* (Fig. 7a-c) y ii) cristales de calcita con textura *blocky* (Fig. 7d-e), asociado al espacio libre como resultado de un relleno parcial de la estructura.

Los cristales de calcita tipo *stretched* presentan superficies estilolíticas impregnadas con bitumen, con presencia de cristales de cuarzo diagenético asociado (Fig. 7a). En catodoluminiscencia se observan tres eventos de mineralización, cristales de calcita *stretched* 1 (CalS<sub>1</sub>) con luminiscencia débil rojo, cristales de calcita *stretched* 2 (CalS<sub>2</sub>) que contiene fragmentos de CalS<sub>1</sub> y presenta luminiscencia moderada a intensa roja-anaranjada y cristales de cuarzo sin luminiscencia (Figs. 7b-c). CalS<sub>1</sub> y CalS<sub>2</sub> presentan inclusiones fluidas orgánicas, primarias y pseudosecundarias, con disposición aleatoria y alineada respectivamente, que presentan fluorescencia celeste bajo luz ultravioleta. Los cristales de calcita tipo *blocky* constituyen cristales con gran desarrollo (~3 mm; Fig. 7d), se observa un núcleo conformado por calcita *blocky* 1 (CalB<sub>1</sub>) con aspecto turbio que culmina con sobrecrecimiento límpido de calcita *blocky* 2 (CalB<sub>2</sub>). En catodoluminiscencia, CalB<sub>1</sub> presenta luminiscencia débil rojo apagada mientras que CalB<sub>2</sub> presenta zonación con alternancia de bandas con luminiscencia débil roja



**Figura 4.** Falla buzante al SO afectando a la Formación Los Molles. a) Nótese la estratificación (flechas negras) en discordancia angular respecto al plano de falla (violeta). La proyección estereográfica indica la relación entre la estratificación (negro) y la falla (violeta) en cada caso. b) Detalle del material cementante alojado en el plano de falla.

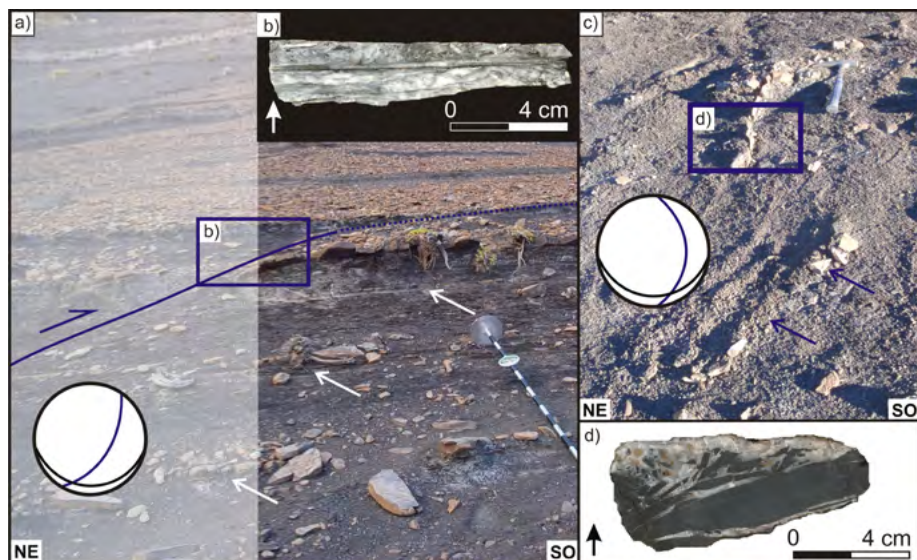


**Figura 5.** Falla buzante al SO. a) Foto con lupa binocular con polarizador donde se observan los cristales de calcita con textura *blocky* (CalB<sub>1</sub>) cortados por microvenillas cementadas con calcita (CalB<sub>2</sub>). b) Detalles de la figura 5a donde se observan zonas con estilolitización y presencia de cristales CalB<sub>1</sub> deformados (flecha blanca). c-d) Imágenes de catodoluminiscencia donde se observa luminiscencia roja moderada en los cristales de CalB<sub>1</sub>, luminiscencia roja débil para los cristales de CalB<sub>2</sub> mientras que cuarzo (Qz) asociado a superficies de estilolitización es no luminiscente. Microscopía de catodoluminiscencia.

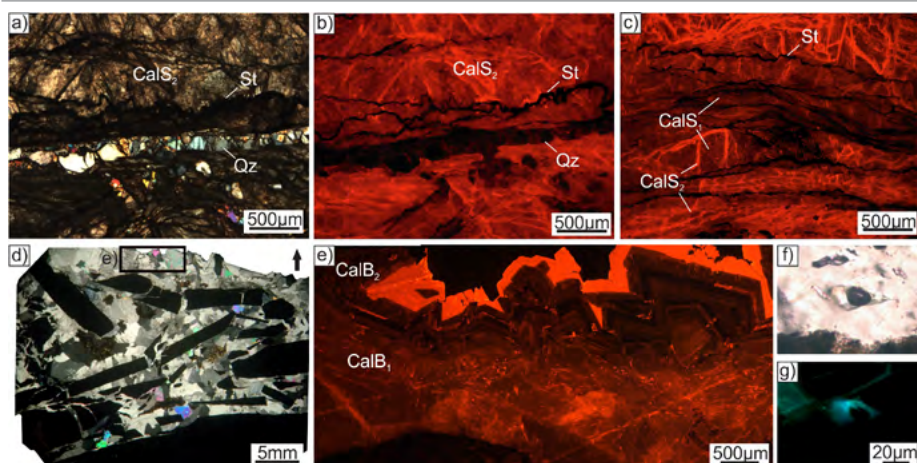
y bandas con luminiscencia muy intensa roja-anaranjada (Fig. 7e). CalB<sub>1</sub> y CalB<sub>2</sub> presentan inclusiones fluidas primarias, orgánicas, dispuestas en forma aleatoria, que presentan fluorescencia celeste bajo luz ultravioleta (Figs. 7f y g).

**2) Fracturas discordantes:** La secuencia relevada se encuentra afectada de base a techo por fracturas sistemáticas discor-

dantes respecto a la estratificación, con buzamiento general de 80-90° NO/SE (Fig. 2), espesores de entre 0,1 y 3 cm y cemento carbonático (calcita en todos los casos). En el análisis al microscopio se identificaron varias generaciones de fracturas y microfracturas, que de acuerdo a la morfología de los cristales y a la dirección de crecimiento de estos pueden agruparse en: 2.1. fracturas con crecimiento



**Figura 6.** Fallas buzantes al E/SE. a) Planos de falla (trazo violeta) afectando la secuencia sedimentaria (flechas blancas indicando estratificación). La proyección estereográfica indica la relación entre la estratificación (negro) y la falla (violeta) en cada caso. b) Detalle del material cementante. Nótese el carácter sincinemático (Ver ubicación en figura 6a). c) Plano de falla afectando la secuencia sedimentaria indicado por flechas violetas. La proyección estereográfica indica la relación entre la estratificación (negro) y la falla (violeta) en cada caso. d) Detalle del material cementante y la roca de caja, con textura cataclástica.



**Figura 7.** Fallas buzantes al E/SE con cristales de textura stretched. a-b) Superficies estiolíticas (St) con cuarzo diagenético (Qz) en fallas cementadas con cristales de calcita stretched (CalS<sub>2</sub>). Microscopía de transmisión y catodoluminiscencia. c) Cristales con luminescencia roja débil (CalS<sub>1</sub>) son cortados por cristales con luminescencia roja moderada-intensa (CalS<sub>2</sub>). Fallas buzantes al E/SE con cristales de textura blocky. d) Foto con lupa binocular con polarizador donde se observa el relleno de falla con textura de cataclasita. e) Imagen de catodoluminiscencia donde se observan los cristales blocky con luminescencia roja débil (CalB<sub>1</sub>) que hacia sus bordes gradan a cristales con luminescencia zonada (CalB<sub>2</sub>) (ver ubicación en Fig. 7d). f-g) Inclusiones fluidas primarias con fluorescencia celeste. Microscopía de transmisión y fluorescencia.

sintaxial y textura cristalina blocky y 2.2. fracturas con crecimiento tipo crack-seal y textura cristalina stretching.

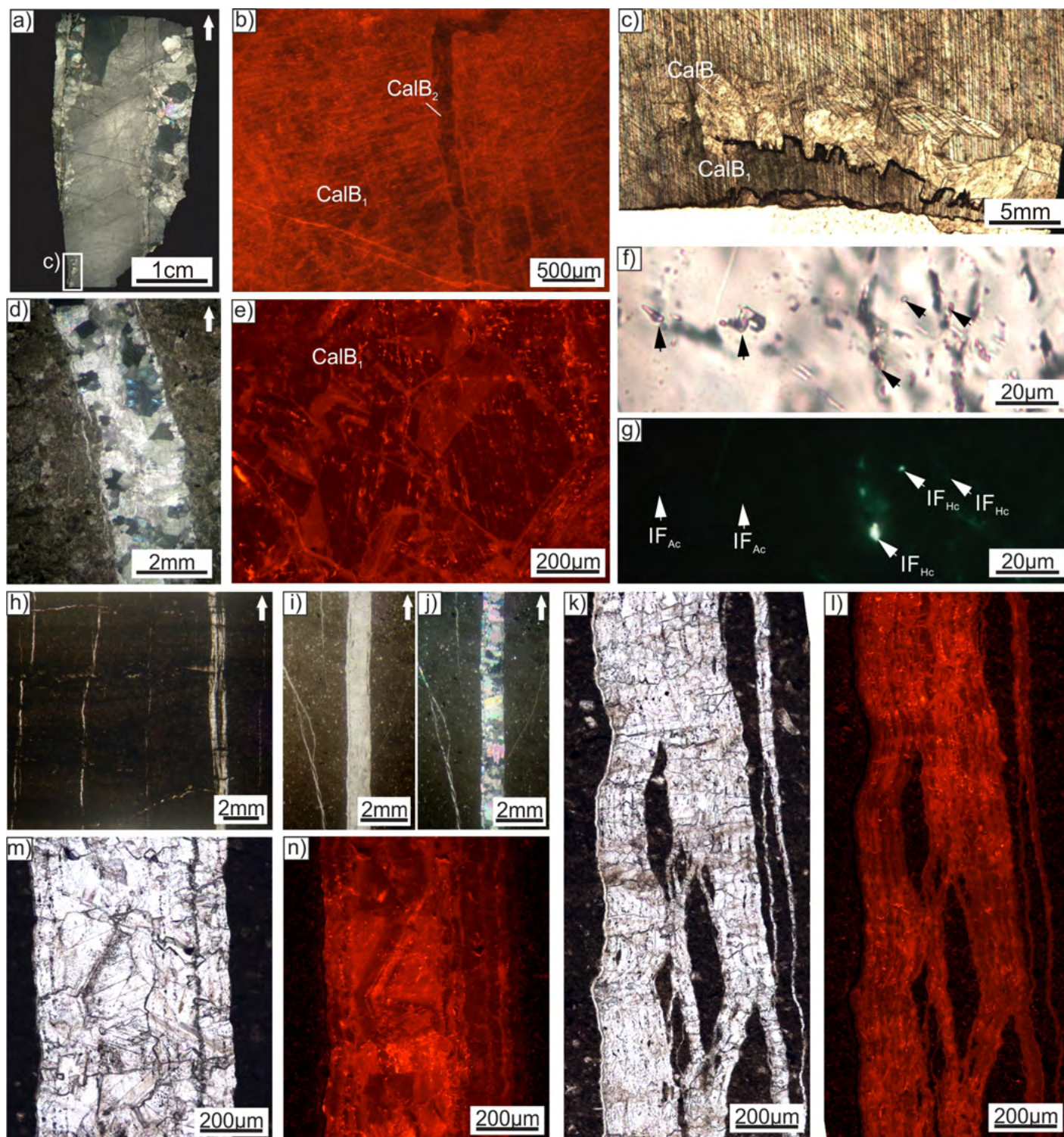
**2.1. Fracturas con crecimiento sintaxial y textura cristalina blocky:** La mineralización presenta crecimiento cristalino sintaxial desde los límites con la caja hacia el centro de la venilla. Es posible observar una primera generación de cristales blocky de grano fino y aspecto turbio en el límite con la caja, seguidos por una segunda generación de cristales blocky de grano grueso

hacia el centro (Figs. 8a y d). El aumento de tamaño cristalino de manera simétrica desde el borde hacia el centro con desarrollo de una línea media de sutura o vacía es un rasgo típico del crecimiento sintaxial (Passchier y Trouw 2005). Diferencias texturales en las venillas dependiendo de la textura de la roca de caja que las aloja se han observado con catodoluminiscencia. En rocas pelíticas los cristales muestran luminescencia moderada a intensa color roja y presentan microvenillas (Fig. 8b) y

zonas asociadas a estilolitización (Fig. 8c) con luminescencia roja con intensidad débil en cristales límpidos de calcita vinculada a un pulso tardío (Fig. 8b). En las fracturas alojadas en rocas psamíticas (Fig. 8d) los cristales de calcita muestran una débil zonación con alternancia de luminescencia débil a moderada color rojo (Fig. 8e). Se identificaron inclusiones fluidas orgánicas primarias, monofásicas, con disposición errática y tamaño < 3 μm, que presentan fluorescencia color verde o amarilla bajo luz ultravioleta (Figs. 8f y g). Inclusiones fluidas orgánicas secundarias, se disponen en alineaciones que cortan a los cristales, son monofásicas, con tamaño < 3 μm y presentan fluorescencia celeste bajo luz ultravioleta. Se observó un segundo pulso de inclusiones secundarias, acuosas, bifásicas con una relación de fases líquido>>vapor (Figs. 8f- g).

**2.2. Fracturas con crecimiento tipo crack-seal y textura cristalina stretching:** Venillas de muy poco espesor (~1mm; Figs. 8h-j) compuestas por bandas de entre 100-150 μm, muestran eventos de precipitación multipisódica cementando la fractura (Fig. 8k). Cada banda está formada por cristales de calcita sin dirección preferencial de crecimiento, rasgo típico de las venillas cementadas por mecanismos de tipo crack-seal y desarrollo cristalino tipo stretching (Bons *et al.* 2012). Fragmentos de la roca encajante quedan retenidos en el centro de la estructura revelando los sucesivos eventos de fracturación y cementación (Fig. 8k). La luminescencia de los cristales es moderada y de color roja (Fig. 8l). Por sectores dentro de la venilla, las bandas poseen reemplazo por una calcita más límpida de grano grueso, que presenta zonación con zonas de mayor o menor luminescencia (Fig. 8 m-n). Las inclusiones fluidas presentes se ubican entre los límites de las bandas que constituyen cada episodio de cementación de la venilla, no presentan fluorescencia y su tamaño es muy pequeño para su caracterización a escala micrométrica (Fig. 8m).

**3) Fracturas concordantes.** Se presentan a lo largo de la secuencia relevada como un rasgo común, orientadas paralelas al buzamiento de la secuencia. El espesor de estas fracturas es variable, entre 2 a 3 milímetros y en algunos casos hasta apro-



**Figura 8.** Fracturas discordantes con crecimiento sintaxial y textura cristalina *blocky*. a) Fractura en rocas pelíticas cementada con cristales de calcita con textura *blocky* de grano fino en el borde y grueso en el sector central. b) Imagen de catodoluminiscencia de la muestra provista en la figura 8a. Luminiscencia roja moderada en cristales de calcita *blocky* (CalB<sub>1</sub>) que son cortados por microvenillas con calcita *blocky* (CalB<sub>2</sub>) con luminiscencia apagada. c) Estilolitas cortan a CalB<sub>1</sub> y presentan asociado un nuevo pulso de cementación (CalB<sub>2</sub>) (ver ubicación en Fig. 8a). d) Fractura de un estrato arenoso cementada con cristales de calcita con textura *blocky*. e) Cristales *blocky* con luminiscencia zonada en venilla alojada en areniscas. Microscopía de catodoluminiscencia. f-g) Inclusiones fluidas primarias orgánicas con fluorescencia amarilla (IF<sub>o</sub>) e inclusiones fluidas secundarias acuosas (IFAc). Fracturas con crecimiento tipo *crack-seal* y textura cristalina *stretching*. h-j) Venillas multipisódicas con crecimiento de tipo *crack-seal* en lupa binocular con polarizador. k-l) Cada banda de la venilla representa un evento de precipitación. Durante los sucesivos eventos de rotura y cementación, fragmentos de la roca de caja quedan retenidos en la estructura resultante. Los cristales presentan luminiscencia roja moderada. Microscopía de polarización y catodoluminiscencia. m-n) Venilla *crack-seal* recristalizada, donde se observa una obliteración de las bandas centrales de la estructura dando lugar a cristales *blocky* de mayor tamaño, que presentan zonación con alternancia de mayor y menor luminiscencia. Nótese la presencia de inclusiones fluidas muy pequeñas delimitando las bandas que no fueron obliteradas por la recristalización (flechas negras). Microscopía de polarización y catodoluminiscencia.



ximadamente 10 centímetros. Presentan cemento de composición carbonática. El análisis al microscopio mostró aspectos que permiten definir dos grupos: 3.1. fracturas concordantes a la estratificación y crecimiento cristalino sincinemático, tipo *stretching* y, 3.2 fracturas concordantes con crecimiento antitaxial.

**3.1. Fracturas concordantes a la estratificación y crecimiento cristalino sincinemático, tipo *stretching*:** En afloramiento es posible reconocer y medir tanto la orientación espacial como la presencia de estrías en los límites de las fracturas con la roca de caja, revelando desplazamiento de los niveles que las contienen (Fig. 9). Su espesor no supera los 5 cm y su presencia es muy común a lo largo de la sección relevada.

Al microscopio se presentan compuestas por cristales de calcita *stretched* dispuestos en bandas paralelas a la pared de la venilla (Figs. 10a y b). Cada una de estas bandas representa un evento de precipitación, separado por superficies de estilolización oscuras debido a la presencia de bitumen y en menor medida, restos de la roca hospedante (Fig. 10c). Los cristales de calcita presentan catodoluminiscencia homogénea moderada color rojo (Fig. 10d).

Se identificaron inclusiones fluidas orgánicas, primarias aisladas con disposición errática, monofásicas, con tamaños < 3  $\mu\text{m}$ , que presentan fluorescencia amarilla moderada a intensa bajo luz ultravioleta. Un segundo grupo de inclusiones fluidas orgánicas de tipo secundarias se disponen en alineaciones que cortan los cristales, son inclusiones fluidas monofásicas, con tamaño < 3  $\mu\text{m}$  y fluorescencia celeste intensa bajo luz ultravioleta.

**3.2. Fracturas concordantes con crecimiento antitaxial:** Su análisis al microscopio muestra textura de cementación de tipo antitaxial, donde los cristales de calcita que cementan la venilla crecen desde la línea media de sutura hacia la roca de caja. De acuerdo a la dimensión de los cristales, la cantidad de eventos de cementación y procesos diagenéticos presentes se subdividieron en dos grupos: 3.2.1. fracturas concordantes antitaxiales con origen tectónico y 3.2.2. fracturas concordantes antitaxiales con origen tectónico-diagenético.



**Figura 9.** Fractura concordante a la estratificación y cemento asociado. En la imagen de la derecha se observan las estrías asociadas al desplazamiento de la roca de caja sobre el techo de la venilla.

**3.2.1. Fracturas concordantes antitaxiales con origen tectónico:** Este tipo de fracturas se encuentran distribuidas de manera errática en la columna, presentándose continuas, con lateralidad persistente, o interrumpidas y coalescentes, en este último caso con espesor milimétrico. Su espesor no supera los 3-4 cm y su cemento es carbonático (Fig. 10e-l).

Presentan crecimiento antitaxial conformado por cristales de calcita con textura fibrosa, pudiendo mostrar varios pulsos de precipitación, en cuyo caso el más moderno se sobrepone al más antiguo (Fig. 10e-f). Cuarzo se encuentra como reemplazo de los cristales fibrosos; estos cristales reemplazados presentan un aspecto turbio debido al contenido de abundantes impurezas (Fig. 10g). Se observan procesos de deformación cristalina sobrepuestos, pudiendo mencionarse recristalización dinámica en cristales discordantes a la dirección principal de crecimiento de los cristales fibrosos, límites aserrados entre cristales, maclas de trayectoria curva o formas lenticulares y terminaciones abruptas (en forma de cuña) (Figs. 10h-k). Microfracturas (200  $\mu\text{m}$ ) cementadas con calcita con textura tipo *blocky* cortan en forma discordante a los cristales fibrosos. Las microvenillas resultantes muestran sobrecrecimiento de cuarzo en sectores donde los cristales fibrosos fueron previamente reemplazados por cuarzo (Fig. 10g).

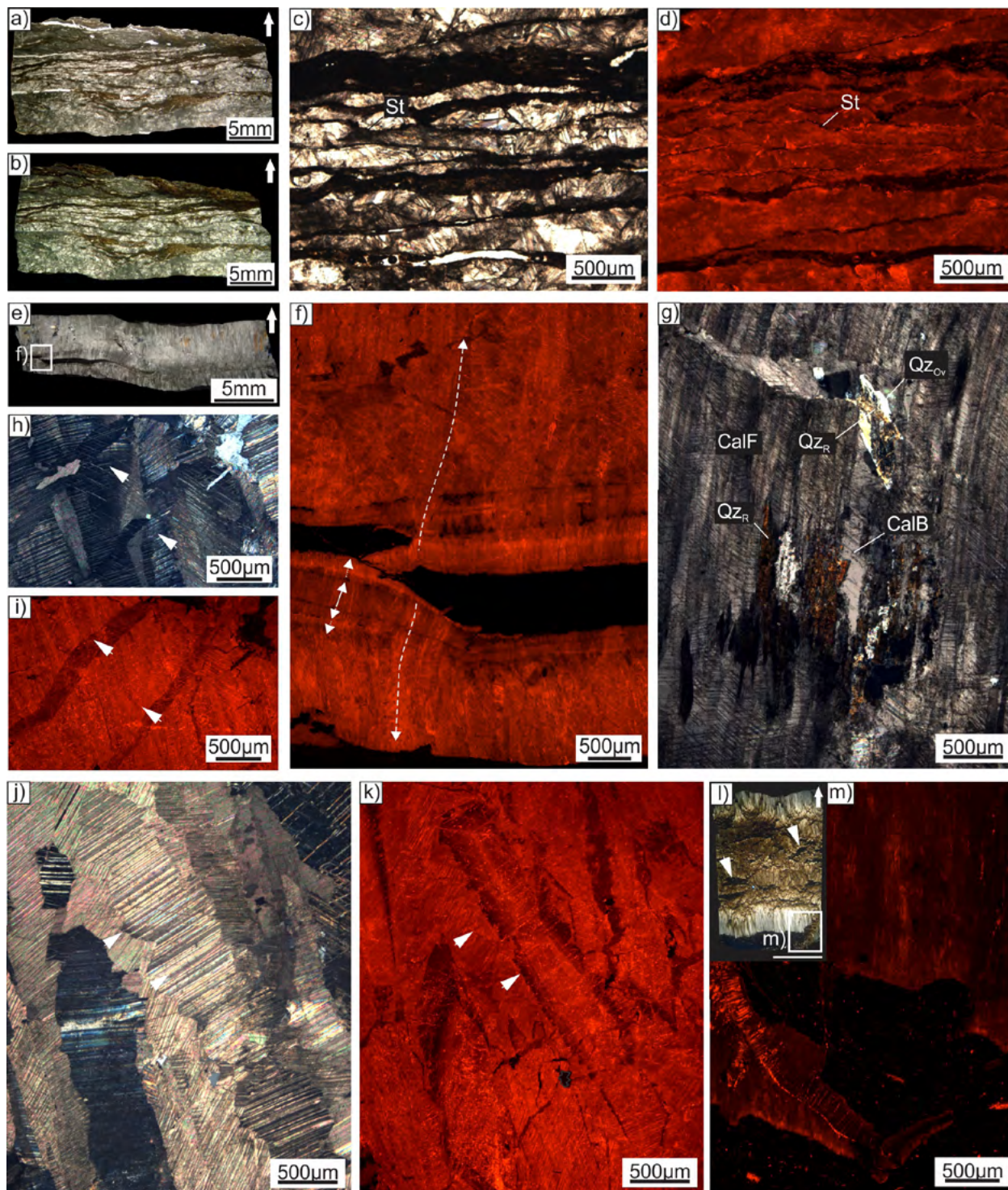
Los estudios de catodoluminiscencia muestran luminiscencia roja intensa en los cristales fibrosos mientras que los rasgos asociados a eventos posteriores de cementación y/o deformación presentan luminiscencia débil color rojo (Fig. 10f, i y k). En los cristales con textura fibrosa se

identificaron inclusiones fluidas monofásicas orgánicas, de origen pseudosecundario, alineadas según planos de clivaje y planos de macla, que presentan fluorescencia color amarilla bajo luz ultravioleta.

**3.2.2. Fracturas concordantes antitaxiales con origen tectónico-diagenético:** Estas venillas fueron relevadas entre los estratos fangolíticos/carbonáticos en la parte superior de la Formación Los Molles, en cercanías al contacto con los niveles evaporíticos de la Formación Tábanos. Poseen un espesor variable de entre 3,5 a 8 cm y presentan una compleja estructura interna debido a la multiplicidad de eventos de precipitación y texturas de disolución y precipitación (Fig. 10l). Las fibras presentan en el centro longitudes de hasta 1 mm, notablemente menores que hacia el borde de la venilla donde los cristales fibrosos de calcita poseen importante longitud (hasta 7-8 mm). Cada uno de estos episodios presenta terminaciones con estructuras como en cono marcadas por la presencia de materia orgánica y fragmentos de material correspondiente a la roca hospedante (Fig. 10l). Los cristales fibrosos de calcita se encuentran sutilmente curvados y presentan luminiscencia muy débil y homogénea color roja (Fig. 10m). No se observaron inclusiones fluidas, posiblemente debido al delgado espesor de los cristales fibrosos.

## DISCUSIÓN

A partir del estudio a escala macro, meso y microscópica de las estructuras tectónicas y los cementos asociados, se identificaron varios aspectos vinculados a la deformación de la Formación Los Molles en el sec-



**Figura 10.** Fracturas concordantes a la estratificación y crecimiento cristalino sincinemático, tipo stretching: a-b) Imagen en lupa binocular con polarizador del relleno de una fractura concordante con cristales con textura stretching. c-d) Cristales stretched separados por superficies estilolíticas (St) impregnadas con bitumen. Los cristales de calcita presentan luminiscencia moderada color roja-anaranjada. Microscopía de transmisión y catodoluminiscencia. Fracturas concordantes de origen tectónico con crecimiento antitaxial: e) Imagen en lupa binocular con polarización de una venilla antitaxial con textura fibrosa. f) Cristales fibrosos con crecimiento antitaxial que se superponen a los cristales precipitados en los eventos previos. Fragmentos de la roca de caja son incorporados durante los eventos de fracturación-precipitación (Ver ubicación en Fig. 10e); g) Microvenilla corta a los cristales fibrosos (CalF) reemplazados por cuarzo (QzR). En la microvenilla los cristales reemplazados por cuarzo presentan sobrecrecimiento (QzOv) y son cementadas por cristales de calcita con textura blocky (CalB); h-i) Recristalización dinámica en cristales discordantes a la dirección principal de crecimiento de los cristales fibrosos. Los cristales asociados a la deformación presentan luminiscencia más débil que los cristales originales (ver flechas blancas). Microscopía de transmisión y catodoluminiscencia. Fracturas concordantes de origen tectónico-diagenético con crecimiento antitaxial. j-k) Cristales fibrosos con deformación cristalina superpuesta resultando en cristales con límites aserrados, terminaciones de los mismos en forma de cuña y bordes recristalizados con luminiscencia más débil que el cristal original. Microscopía de transmisión y catodoluminiscencia. Fracturas concordantes de origen tectónico-diagenético con crecimiento antitaxial. l) Imagen en lupa binocular con polarizador de las venillas antitaxiales con cristales fibrosos y texturas como en cono. Nótese los fragmentos de materia orgánica y roca de caja en el contacto entre los sucesivos eventos de precipitación. La barra representa la escala, equivale a 1cm; m) Cristales fibrosos con luminiscencia débil color rojo.

tor de Chacay Melehue y los fluidos mineralizantes que participaron al momento de la expulsión de los hidrocarburos.

### **Evolución estructural para la Formación Molles en la zona de Chacay Melehue**

El fallamiento relevado corresponde al desarrollo orogénico de la faja plegada y corrida de Chos Malal para el sector estudiado de la Cordillera del Viento. El fallamiento buzante al SO (retropais) se vincula a los sistemas de corrimientos provergentes responsables de la deformación del basamento y de la cubierta sedimentaria suprayacente (deformación piel gruesa) a fines del Cretácico (Sánchez *et al.* 2018). Las fallas buzantes al E/SE pertenecen a estadios orogénicos más modernos, donde la deformación de la faja plegada y corrida Chos Malal en el área se asocia a estructuras retrovergentes ubicadas exclusivamente en la cubierta sedimentaria. Este último estadio se produce a fines del Mioceno, afecta solamente a la columna estratificada solidaria al basamento y ha sido relevado y caracterizado en la zona al este de Chacay Melehue por Sánchez *et al.* (2018). El reconocimiento de este tipo de estructuras tectónicas constituye un aporte fundamental en la resolución de los problemas vinculados a la medición de espesores e incluso a la interpretación de eventos depositacionales sin el control de la ubicación estructural de los sectores de la secuencia medidos.

En el caso de la fracturación natural presente en el área, la posibilidad de reconocer y medir la sistemática presente permite, además de identificar condiciones de presiones de fluido anómalas, realizar un control de las estructuras asociadas a la construcción del orógeno (fallamiento y plegamiento asociado) (Morley *et al.* 2017). La cementación de los planos de fallas o de fracturas revela la interacción entre los fluidos diagenéticos alojados por la Formación Los Molles y la tectónica que afecta a la unidad a partir del Mesozoico. Venillas discordantes o concordantes a la estratificación son rasgos comunes en secuencias de fangolitas deformadas, pero no siempre se encuentran estrías asociadas a movimiento de cizalla en el cemento de las mismas (Morley *et al.* 2017). Para el caso de la Formación Los Molles, el

sentido de desplazamiento de las fallas (hacia el Este para el Cretácico y NNE/ NNO para el Mioceno) es coherente con la orientación del esfuerzo máximo compresivo asociado a la Orogenia Andina a partir de límite Cretácico-Terciario (Vergani *et al.* 1995).

### **Cementos: dirección de crecimiento y texturas cristalinas**

La presencia de fracturas cementadas discordantes o concordantes respecto a la estratificación permite interpretar variaciones en la relación entre la presión hidrostática y litostática, donde la presión de fluidos posee un rol fundamental (Bons *et al.* 2012). En el caso de la Formación Los Molles, su evolución diagenética como roca generadora de hidrocarburos condiciona, a través de la distribución anómala de la presión de fluidos, el comportamiento frágil/dúctil de su registro stratigráfico. La reología de la roca de caja controla la actual fracturación stratigráfica, con el desarrollo de fracturas discordantes a la estratificación bien desarrolladas en las rocas más tenaces (carbonatos) y fracturas concordantes a la estratificación en texturas fangolíticas o en los contactos entre distintas litologías. Este comportamiento reológico ya ha sido documentado para secuencias sedimentarias similares (Ghosh *et al.* 2018).

Las fracturas discordantes respecto a la estratificación se vinculan a la construcción del orógeno andino en la zona de la Cordillera del Viento. Las texturas tipo *blocky* con crecimiento sintaxial, vinculadas a diaclasas, o los procesos de fracturación multiepisódicos en el desarrollo de texturas *stretched* en venillas de tipo crack-seal indican la presencia de sucesivos eventos de deformación frágil en donde la fracturación permite registrar la temporalidad y tipo de fluidos a lo largo del tiempo a través de su cemento.

Para el caso de la fracturación concordante respecto a la estratificación, su origen también se interpreta asociado a la evolución tectónica de la Formación Los Molles en la zona de Chacay Melehue, pero con distintos aspectos de acuerdo a la impronta diagenética al momento de su generación. Las fracturas concordantes con crecimiento sincinemático muestran

texturas de crecimiento cristalino asociado al desplazamiento de la roca hospedante, pudiendo medirse estrías en algunas ocasiones. Este tipo de fractura se vincula directamente al tectonismo, en donde la construcción del orógeno involucra plegamiento y por sectores, deslizamiento flexural interestratal resolviendo el acortamiento cuando la competencia de las secuencias multicapas lo permite (Twiss y Moores 1997). Las fracturas concordantes con crecimiento antitaxial, textura fibrosa y múltiples episodios de cementación son habituales en ambientes de fajas plegadas y corridas, en secuencias sedimentarias con alto potencial oleogénico que desarrollan barreras de permeabilidad y presiones anómalas (Gale *et al.* 2014, Zarella *et al.* 2014). Es común la presencia, dentro del cemento, de fragmentos roca de caja y bitumen. Estas fracturas registran a través de la precipitación de calcita en el sector estudiado, condiciones de sobrepresión asociadas a la generación y expulsión de hidrocarburos en planos de orientación paralela a esfuerzos compresivos horizontales de la Orogenia Andina. Las estructuras concordantes con crecimiento antitaxial multiepisódico de textura fibrosa y con estructuras como en cono sólo se relevaron en el techo de la Formación Los Molles, a pocos metros del contacto con la Formación Tábanos. El origen de estas fracturas se interpreta, preliminarmente, asociado a la presión de fluidos anómala local en respuesta a la presencia de una litología impermeable como los niveles evaporíticos que se encuentran inmediatamente por encima de esta unidad (Al-Aasm *et al.* 1992). La combinación de los eventos compresivos andinos y la barrera de permeabilidad suprayacente impiden la movilización de los fluidos, que precipitan en estas venillas.

### **Luminiscencia del cemento y de las inclusiones fluidas**

Calcita es el mineral cementante principal con cuarzo como mineral minoritario registrado solamente en algunas de las estructuras relevadas. La presencia persistente de calcita como mineral cementante, podría estar sujeto a la presencia de un fluido que es enriquecido en carbonato por las aguas de formación y por los fluidos diagenéticos de la roca de caja

(Bons *et al.* 2012). La luminiscencia analizada muestra distintas tonalidades roja con intensidad tenue hasta muy intensa, tanto en las fallas como en las fracturas concordantes y discordantes respecto a la estratificación, con zonaciones cristalinas. Las texturas fibrosas y *stretching* presentan luminiscencia homogénea mientras que en el caso de las texturas *blocky* se observaron cristales con luminiscencia homogénea como así también cristales con luminiscencia zonada, tanto asociados a fallas con cementación parcial como a fracturas discordantes y concordantes con procesos de deformación-recristalización. Cambios en la luminiscencia de los carbonatos pueden indicar cambios en la composición química del fluido, debido a la presencia en cantidades traza de elementos activadores (por ej. Mn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>) o supresores (por ej. Fe<sup>2+</sup>) de la luminiscencia (Marshall y Mariano 1988, Flugel 2010). Posibles cambios en la composición del fluido podría estar asociado a mayor tiempo de residencia del fluido en la estructura, con un tiempo de precipitación de los cristales más prolongado donde el fluido puede interactuar con la roca de caja o con otros fluidos modificando de este modo su composición (fallas parcialmente cementadas). Por otro lado, en procesos de recristalización, la disolución-precipitación dan lugar a la mezcla de fluidos de distintas composiciones favoreciendo la concentración diferencial de elementos en los sucesivos eventos de precipitación resultando en cristales zonados (estructuras con registro de deformación-recristalización). De este modo, el comportamiento de la luminiscencia en los cementos relevados en las diferentes estructuras refleja la compleja evolución de los fluidos durante la historia depositacional y postdeposicional de la Formación Los Molles.

La evaluación de las inclusiones fluidas ha permitido hallar al menos dos pulsos de migración de hidrocarburos. Inclusiones fluidas primarias y pseudosecundarias en las fallas más antiguas como en las estructuras subsidiarias asociadas, presentan fluorescencia amarilla, registrando la expulsión de hidrocarburos líquidos en etapa de catagénesis (Tissot y Welte 1984). Este evento se correspondería con las estructuras tectónicas asociadas al levantamiento de la Cordillera del Viento du-

rante el Cretácico, sistema de fallamiento buzante hacia el SO y fracturas naturales discordantes y concordantes respecto a la estratificación con crecimientos sintaxiales y antitaxiales respectivamente. Inclusiones fluidas con fluorescencia azul se presentan como inclusiones primarias en las fallas más modernas, sistema de fallamiento buzante hacia el E-SE, y como inclusiones fluidas secundarias en fracturas discordantes y concordantes previas. Este evento coincide con el episodio de fallamiento retrovergente más moderno desarrollado durante el Mioceno. La fluorescencia celeste se corresponde a un estadio termal más evolucionado de metagénesis con generación de gas metano (Tissot y Welte 1984). La sobreimposición de eventos de deformación sucesivos en los cementos queda registrada a partir del desarrollo de microfracturas, recristalización dinámica y recristalización de calcita con inclusiones fluidas de fluorescencia azul. En el caso de las venillas concordantes a la estratificación con crecimiento antitaxial multiepisódico y textura fibrosa con estructuras como en cono, la notable ausencia de fluidos orgánicos en las inclusiones fluidas sustenta la interpretación de su génesis asociada a la combinación de la tectónica y fluidos diagenéticos póstumos en el contacto entre la Formación Los Molles y las evaporitas de la Formación Tábanos.

## CONCLUSIONES

El relevamiento de cementos en fallas y fracturas en la Formación Los Molles en la sección tipo de Chacay Melehue permite identificar, preliminarmente, distintos aspectos asociados a la evolución tectónica del área así como al tipo de fluidos diagenéticos presente durante la misma. La secuencia aflorante de la Formación Los Molles se encuentra afectada en el sector de estudio por fallas cuyas orientaciones y desplazamiento se vinculan a la construcción de la faja plegada y corrida de Chos Malal en la Cordillera del Viento, a través de sistemas de corrimiento y retrocorrimientos (deformación de piel gruesa y fina).

La fracturación asociada a los distintos pulsos de deformación de la Orogenia

Andina afecta la columna sedimentaria a través de la fracturación estratigráfica, destacándose fracturas discordantes y concordantes respecto a la estratificación. La dirección de crecimiento de los cristales de calcita y sus texturas dependen de la impronta del proceso que genera la fractura: tectónico, diagenético o una combinación de ambos. La reología de la roca de caja posee un rol fundamental en la orientación y cementación de la fractura. La evolución del evento tectónico en el tiempo queda registrada en los cementos a partir de la deformación cristalina de las texturas preexistentes (recristalización dinámica, superficies de estilolitización, microfracturación) y variación de la luminiscencia del material cementante.

El análisis de las inclusiones fluidas permite establecer dos episodios de expulsión de hidrocarburos en distintos estadios termales de la Formación Los Molles realizado a través de fluorescencia: el primero registrando hidrocarburos líquidos caracterizado por fluorescencia amarilla en fracturas discordantes y concordantes, asociado al levantamiento de la Cordillera del Viento a fines del Cretácico; y un segundo episodio, póstumo, de expulsión de hidrocarburos gaseosos caracterizado por fluorescencia celeste, sobreimpreso en la fracturación natural presente en la columna asociado al evento datado en el Mioceno.

Las fracturas concordantes en el contacto entre la Formación Los Molles y la Formación Tábanos, al techo del Grupo Cuyo, tendrían su origen asociado al comportamiento de las evaporitas como horizonte impermeable.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se financió con fondos otorgados por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNS (SECyT-UNS: PGI 24/H128). Se agradece al Departamento de Geología de la UNS por la utilización del equipamiento disponible tanto de campo como de laboratorio. Los autores desean expresar su agradecimiento al editor Dr. Mariano Larrovere y a los revisores anónimos, cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar notablemente la calidad de esta contribución.

## REFERENCIAS

- Al-Aasm, I., Muir, I. y Morad, S. 1992. Diagenetic conditions of fibrous calcite vein formation in black shales: petrographic, chemical and isotopic evidence. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 41: 46-56.
- Arregui, C., Carbone, O. y Martínez, R. 2011. El Grupo Cuyo (Jurásico temprano-medio) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J.C. y Vallés J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*. Asociación Geológica Argentina, 77-89, Neuquén.
- Bons, P., Elburg, M. y Gomez-Rivas, E. 2012. A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *Journal of Structural Geology* 43: 33-62.
- Burrus, R.C. 1981. Hydrocarbon fluid inclusions in studies on sedimentary diagenesis. En Hollister, L.S. y Crawford, M.L. (eds.), *Short Course handbook v. 6, Fluid inclusions: applications to petrology*. Mineralogical Association of Canada: 138-154, Ottawa.
- Chebli, G., Mendiberry, H., Giusiano, A., Ibáñez G. y Alonso J. 2011. El shale gas en la provincia de Neuquén. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas: 669-691, Mar del Plata.
- Di Giulio, A., Ronchi, A., Sanfilippo, A., Tiepolo, M., Pimentel, M. y Ramos, V. 2012. Detrital zircon provenance from the Neuquén basin (south-central Andes): Cretaceous geodynamic evolution and sedimentary response in retroarc-foreland basin. *Geology* 40: 559-562.
- Flügel, E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. 2nd Edition. Springer, 924 p., Berlin.
- Fortunatti, N. y Rainoldi, A.L. 2018. Migración de hidrocarburos a través del estudio de cementos en estructuras tectónicas, Formación Los Molles, Chacay Melehue, Cordillera del Viento, Neuquén. 17° Reunión de Tectónica, Resúmenes: 55, La Rioja.
- Gale, J., Reed, R. y Holder, R. 2007. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fractures treatments. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 91: 603-622.
- Gale, J., Laubach, S., Olson, J., Eichhubl, P. y Fall, A. 2014. Natural fractures in shale: A review and new observations. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 98: 2165-2216.
- Ghosh, S., Galvis-Portilla, H., Klockow, C. y Slatt, R. 2018. An application of outcrop analogues to understanding the origin and abundance of natural fractures in the Woodford Shale. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 164: 623-639.
- Goldstein, R.H. y Reynolds, T.J. 1994. *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. Society for Sedimentary Geology Short Course: Handbook 31, Boulder.
- Guliano, C.A. y Gutierrez Pleimling, A.R. 1994. *Field guide. The Jurassic of the Neuquén Basin* a) Neuquén province. Asociación Geológica Argentina Serie E, 2, 111 p., Buenos Aires.
- Holditch, S. 2013. Unconventional oil and gas resource development - Let's do it right. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources* 1-2: 2-8.
- Jarvie, D. 2012. Shale resource Systems for Oil and Gas: Part 1- Shale-gas Resource systems. En Breyer J.A. (ed.) *Shale reservoirs—Giant resources for the 21st century*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 97: 69-87, Tulsa.
- Jorgensen, L., López Pezéz, A. y Pisani F. 2013. Caracterización de la Fm Los Molles como reservorio de tipo Shale Gas en el ámbito Norte de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina, Mostrando su analogía con reservorio de Shale Gas probado en EE.UU. *Society of Petroleum Engineers*, 20 p.
- Laubach, S.E., Olson, J.E., Gross, M.R. 2009. *Mechanical and Fracture stratigraphy*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 93: 1413-1426.
- Legarreta, L., Villar, H., Laffitte, G., Cruz, C. y Vergani, G. 2005. Cuenca Neuquina. Balance de masa enfocado a la evaluación del potencial exploratorio de los distritos productivos y de las zonas no productivas. En Chebli G. (ed.) *Frontera Exploratoria de la Argentina*. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 233-250, Buenos Aires.
- Llambías, E., Leanza, H. y Carbone, O. 2007. Evolución tectono-magmática durante el Pérmico al Jurásico temprano en la Cordillera del Viento (37°10'S – 37°15'S): nuevas evidencias geológicas y geoquímicas del inicio de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 217-235.
- Marshall, D.J. y Mariano, A.N. 1988. *Cathodoluminescence of geologic materials*. Unwin Hyman, 146p. Boston-Londres-Sydney-Wellington.
- Morley, C.K., von Hagke, C., Hansberry, R.L., Collins, A.S., Kanitpanyacharoen, W. y King, R. 2017. Review of major shale-dominated detachment and thrust characteristics in the diagenetic zone: part I, meso-and macroscopic scale. *Earth-Science Reviews* 173: 168-228.
- Passchier, C.W. y Trouw, R.A.J. 2005. *Microtectonics*, second edition. Springer Verlag, 366 p.
- Rainoldi, A.L., Fortunatti, N., Alvarez, S. y Cesaretti, N. 2016. Fósildiagénesis en amonoides como herramienta en el estudio de la migración de hidrocarburos, Formación Los Molles, Neuquén. 12° MinMet, *Acta Geológica Lilloana* 28: 284-286, San Miguel de Tucumán.
- Rainoldi, A.L., Fortunatti, N. y Cesaretti N. 2017. Análisis de microfacies de la Fm Los Molles (Grupo Cuyo), Cuenca Neuquina: aporte preliminar para entender un potencial reservorio shale-gas. 20° Congreso Geológico Argentino, Simposio 4: 83 -88, San Miguel de Tucumán.
- Riecker, R.E. 1962. Hydrocarbon fluorescence and migration of petroleum. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 46: 60-75.
- Sánchez, N., Coutand, I., Turienzo, M., Lebinson, F., Araujo, V. y Dimieri, L. 2018. Tectonic evolution of the Chos Malal fold-and-thrust belt (Neuquén Basin, Argentina) from (U-Th)/He and fission-track thermochronometry. *Tectonics* 37: 1-23.
- Slatt, R., Philp, P., O'Brian, B., Abolesiman, Y., Singh, P., Eslinger, E., Perez, R., Portas, R., Baruch, E., Marfurt, K. y Madrid-Arroyo, S. 2012. Pore-to-regional-scale, integrated characterization workflow for unconventional gas shales. En: Breyer, J.A. (ed.), *Shale reservoirs*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin Memoir 97: 127-150, Tulsa.
- Tissot, B.P. y Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and occurrence*. Springer, 699 p., Berlin-Heidelberg-New York.
- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V. 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: constraints on the Andean uplift from U-Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics* 489: 258-273.
- Twiss, R.J. y Moores, E.M. 2007. *Structural geology*. 2nd Edition. W.H. Freeman and Company, 736 p., New York.
- Uliana M.A., Legarreta, L., Laffitte, G. y Villar, H.J. 2014. *Estratigrafía y geoquímica de las*

- facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina. 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos no Convencionales, Actas: 3-92, Mendoza.
- Vergani, G., Tankard, A.J., Belotti, H.J. y Weodink, H.J. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En: Tankard, A.J., Suarez R. y Welsink, J. (eds.), Petroleum Basins of South America: American Association of Petroleum Geologists Bulletin Memoir 62: 383-402.
- Zanella, A., Cobbold, P.R. y Le Carlier de Veslud, C. 2014. Physical modelling of chemical compaction, overpressure development, hydraulic fracturing and thrust detachments in organic-rich source rock. *Marine and Petroleum Geology* 55: 262-274.