

**Universidad Nacional de Río Negro**

**Sede Alto Valle y Valle Medio**

**Trabajo Final de Licenciatura en Geología**

**RELACIÓN ENTRE LA MINERALIZACIÓN DE  
Cu Y BITUMEN EN EL PROSPECTO LA CUPROSA,  
DORSAL DE HUINCUL, NEUQUÉN**

*Alumno: Maximiliano Paz*

*Directora: María Josefina Pons*

*Co-director: Adolfo Eugenio Giusiano*



General Roca

Marzo 2015

## RESUMEN

La Cuprosa es un depósito de Cu estratiforme hospedado en rocas sedimentarias de tipo *red-bed*, de la Formación Portezuelo (Grupo Neuquén), ubicado sobre el yacimiento hidrocarburífero Aguada Baguales, Dorsal de Huincul. Su historia diagenética puede subdividirse en: diagénesis temprana, ingreso de hidrocarburos, mineralización y telogénesis. Durante la diagénesis temprana se produjeron los cementos de hematita y caolinita, generados por la acción de aguas meteóricas, y calcita I y micro-cuarzo sintaxial. El ingreso de hidrocarburos y sus reacciones redox con la roca generaron ácidos orgánicos y disminución de pH, lo que provocó disolución de clastos y cementos previos, precipitación localizada de calcita barroca II y pirita a expensas de la calcita I y hematita, y generación de cemento circungranular de arcilla (esmectita?), aumentando la porosidad y decolorando la roca. La circulación de salmueras cuencales oxidantes de pH neutro pudo extraer el Cu de los estratos rojos y rocas ígneas subyacentes, transportarlo en solución hasta la Fm. Portezuelo, y provocar la precipitación de la mena (calcopirita) en contacto con el hidrocarburo, generando removilización parcial de hierro de la pirita previa hacia la periferia. La exhumación en el Mioceno originó los procesos telogenéticos, donde las aguas meteóricas alteraron la esmectita a analcima, formaron calcita III, y reemplazaron los sulfuros de Cu por malaquita> crisocola> azurita> brochantita? y pirita por hematita> goethita. La distribución de la decoloración detectada a partir de análisis de imágenes satelitales y la zonación de la alteración pueden ser utilizadas para el estudio de migraciones de hidrocarburos y como guías para la prospección de depósitos de Cu.

**Palabras clave:** depósitos estratiformes de Cu hospedados en rocas sedimentarias, Grupo Neuquén, hidrocarburos, decoloración.

**ABSTRACT Relationship between Cu mineralization and bitumen in the La Cuprosa prospect, Dorsal de Huincul, Neuquén.**

La Cuprosa is a red-bed type sediment-hosted stratiform Cu deposit of the Portezuelo Formation (Neuquén Group), located over the Aguada Baguales oil field, Dorsal de Huincul. Its diagenetic story can be subdivided in: early diagenesis, hydrocarbon ingress, mineralization and telogenesis. During early diagenesis hematite, kaolinite (by the action of meteoric waters), calcite I and syntaxial micro-quartz cements are produced. The hydrocarbon ingress and its redox reactions with the rock generated organic acids and pH decrease, causing clasts and previous cements dissolution, local baroque calcite II and pyrite precipitation at the expense of calcite I and hematite, and generation of clays rims cements (smectite?), enhancing porosity and bleaching the rock. Circulation of near-neutral oxidizing basinal brines could extract Cu from subjacent red beds and igneous rocks, transport it in solution to Portezuelo Formation, and provoked ore precipitation (chalcopyrite) in contact with hydrocarbons, causing partial iron remobilization of the previous pyrite to the periphery. Miocene exhumation originated telogenetic process, where the meteoric waters caused smectite replacement by analcime, calcite III cement, and Cu sulfides replacement by malachite> chrysocolla> azurite> brochantite? and pyrite by hematite> goethite. Bleaching distribution detected by satellite imagery analysis and alteration minerals zonation can be used for hydrocarbon migration studies and as prospection guides for Cu deposits.

**Keywords:** sediment-hosted stratiform Cu deposits, Neuquén Group, hydrocarbons, bleaching.

## INTRODUCCIÓN

La Cuprosa (Figs. 1, 2) es un depósito estratiforme de Cu hospedado en rocas sedimentarias de la Formación Portezuelo (Grupo Neuquén) que forma parte de lo que se conoce como “areniscas cupríferas del Neuquén” (Lyons 1999), y está ubicado a ~25 km al NE de la ciudad de Plaza Huinul. El mismo corresponde a un prospecto en estado de exploración operado por la empresa AMA Resources. Al igual que las mineralizaciones de Cu descriptas para otros sectores de la Cuenca Neuquina, aquí también está hospedada en areniscas del Grupo Neuquén y en contacto con impregnaciones de bitumen (Giusiano *et al.* 2006, 2008, 2009, Paz *et al.* 2014, Pons *et al.* 2009, 2011, 2013a, b, 2014, Rainoldi 2015). La Cuprosa se ubica sobre el yacimiento hidrocarburífero Aguada Baguales (Fig. 1) y en cercanía a los yacimientos Barda González, Huinul, Puesto López, Sierra Barrosa y Puesto Espinoza, entre otros. En el área de estudio, las rocas se encuentran decoloradas (*bleaching*) producto de las reacciones redox entre los hidrocarburos y el cemento hematítico de las rocas (Surdam *et al.* 1993), al igual que en otros sectores de la Cuenca Neuquina (Franchini *et al.* 2014, Pons *et al.* 2015, Rainoldi *et al.* 2012, 2014) y en reservorios de hidrocarburos en todo el mundo (Schumacher 1996 y referencias allí citadas).

El objetivo de esta contribución es: (1) definir las litofacies de la Formación Portezuelo en el prospecto La Cuprosa, (2) describir las facies diagenéticas y su distribución - se define como facies diagenéticas a las sedimentitas que tuvieron procesos post-depositacionales similares y cuyos minerales diagenéticos le confieren a la roca coloraciones distintivas (Beitler *et al.* 2005)-, (3) establecer la cronología entre los minerales diagenéticos, bitumen y mineralización, (4) determinar cuáles fueron las condiciones que favorecieron la circulación de fluidos mineralizantes y la precipitación de Cu, y finalmente (5) comparar estos

resultados con los antecedentes de otros prospectos de Cu similares de la Cuenca Neuquina y del mundo.

### **Antecedentes**

Las primeras menciones de las ocurrencias de Cu en rocas sedimentarias de la Cuenca Neuquina fueron realizadas por Wichmann (1927) en los denominados “Estratos con Dinosaurios” (Grupo Neuquén). En el prospecto Barda González, distante 5 km al SO del área de estudio, Fernández Aguilar (1945) efectuó los primeros intentos de cubicación de recursos, mientras que las campañas de perforación entre los años 1994 y 1998 de distintas empresas mineras (Polimet-MIM, Rio Tinto) calcularon recursos indicados del orden de 35,5 Mt, con un contenido de 0,368% de cobre y una ley de corte de 0,15% (Lyons 1999).

Las primeras hipótesis sobre el origen de estos depósitos de cobre corresponden a Reynoso (1975), quien señala el carácter sedimentario de las mineralizaciones, y Ramos (1975), que relaciona los episodios mineralizantes según la teoría de la bio-rexistasia (Erhart 1956), considerando que el cobre lixiviado por meteorización química del Grupo Choiyoi se incorpora a la roca en un estadio singenético, con la presencia de materia orgánica como trampa reductora. Posteriormente, Lyons (1999) reafirma la hipótesis singenética y destaca al orógeno andino y sus eventos tectónicos como la principal fuente de los fluidos mineralizantes. Finalmente, Giusiano *et al.* (2006, 2008) proponen una nueva hipótesis epigenética que vincula las fallas de la Dorsal de Huincul con las migraciones de hidrocarburos y fluidos con Cu.

### **METODOLOGÍA**

Se realizó un análisis de imágenes satelitales utilizando las bandas del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) del satélite LANDSAT 7, con las cuales se confeccionaron diferentes combinaciones RGB (Fig. 3). Para diferenciar las zonas con óxidos e hidróxidos de hierro en sus distintos estados de oxidación, se realizó una imagen utilizando la combinación de cocientes 3/1, 5/4, 5/7 (Chica-Olmo 2002, fig. 3c), en la que se observa en tonos de rojo los minerales que contienen óxido férrico, de verde los minerales con hierro ferroso, y de azul los minerales arcillosos con iones hidroxilos. Esta misma imagen fue creada, retocada y analizada con el programa ENVI 4.5. A la misma se le realizó un análisis por componentes principales o PCA (*Principal Component Analysis*, fig. 3d), que consiste en una transformación estadística utilizada para reducir el número de variables, y que tiene como objetivo obtener un nuevo conjunto de variables, más pequeño, sin perder una parte significativa de información original (Chuvieco 1990). Posteriormente se realizaron las diferencias desde su histograma. También se confeccionó un mapa con clasificación supervisada, discriminando las zonas con areniscas decoloradas del área de La Cuprosa (verde), de las zonas con óxido de hierro de la Formación Bajo de la Carpa (rojo, fig. 3b). Del análisis de estas imágenes se definió el lugar para realizar un perfil estratigráfico (Fig. 4) y el mapeo de las alteraciones y zonas mineralizadas.

El trabajo de campo consistió en el chequeo de la alteración regional observada en las imágenes, levantamiento de una columna estratigráfica y el relevamiento de aproximadamente 300 m de trincheras en el sector del prospecto La Cuprosa (Fig. 2b), donde además se extrajeron 33 muestras geo-referenciadas para su análisis en laboratorio. La descripción de facies sigue la clásica denominación sugerida por Miall (1978) para ambientes fluviales. Las muestras representativas de las diferentes facies diagenéticas fueron estudiadas en el laboratorio con lupa binocular y tubo de rayos UV de onda corta (254 nm) y larga (365 nm). Luego se realizaron 23 cortes delgados impregnados en resina color celeste para su análisis en

microscopio petro-calcográfico. Los cálculos de porosidad fueron confeccionados a partir de fotomicrografías de 2 muestras representativas de cada facies diagenética, con la herramienta *Object extraction* del *software* JMicrovision v1.27 (Cuadro 1). Los diagramas de concentración de minerales y bitumen del perfil (Fig. 4a) fueron hechos con los datos de estimación visual de las muestras extraídas en el campo.

## MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina es una cuenca de retroarco-antepaís que abarca la mayor parte de la provincia de Neuquén, el sector austral de la provincia de Mendoza, y la porción occidental de las provincias de Río Negro y La Pampa. Su historia evolutiva se extiende desde el Triásico Tardío hasta el Terciario, con un registro de hasta 7.000 m de sedimentitas marinas y continentales (Leanza *et al.* 2001). El basamento de la cuenca está integrado por plutonitas y rocas volcanoclásticas del Pérmico superior-Triásico inferior del Grupo Choiyoi. El Triásico Superior-Jurásico Inferior está caracterizado por rocas volcanoclásticas asociadas a un episodio de rift agrupadas dentro del Ciclo Precuyano (Gulisano 1981). A partir del Jurásico Inferior se instala un arco magmático en el sector occidental, y se depositan los sedimentos de los grupos Cuyo, Lotena y Mendoza, y de la Formación Rayoso, que constituyen facies marinas y continentales asociadas a variaciones eustáticas del océano Pacífico (Legarreta y Uliana 1996). La fase de antepaís tiene lugar a fines del Cretácico Inferior (Tunik *et al.* 2010, Di Giulio *et al.* 2012) con un amplio desarrollo de las sedimentitas continentales del Grupo Neuquén. Por encima se apoyan en discordancia las facies continentales y marinas del Grupo Malargüe (Cretácico Tardío-Paleógeno Temprano), que representan la primera transgresión atlántica de la cuenca (Legarreta y Uliana 1999).

El Grupo Neuquén (Fig. 1c) está formado por ~1200 m de depósitos continentales de origen fluvial, eólico y lacustre somero, de edad cretácica superior (Cazau y Uliana 1973, Garrido 2010 y referencias allí citadas). Agrupa capas rojas compuestas por areniscas, fangolitas y grauvacas, con una menor participación de niveles conglomerádicos con intercalaciones de niveles tobáceos y tufíticos (Garrido 2010). Se divide en 3 subgrupos: Río Limay (formaciones Huincul, Candeleros y Cerro Lisandro), Río Neuquén (formaciones Portezuelo y Plottier) y Río Colorado (formaciones Bajo de la Carpa y Anacleto, Ramos 1981).

La deformación en la Cuenca Neuquina fue multiepisódica desde el Triásico al Terciario (Digregorio y Uliana 1980), y comienza con una etapa de rift entre el Triásico Superior y Jurásico Inferior con la generación de depocentros NO-SE, debido a un retroceso negativo de la trinchera oceánica en el margen Pacífico (Ramos 1999). Desde el Jurásico Inferior al Cretácico Inferior la Cuenca Neuquina cambia a una tectónica compresiva por subducción oblicua de dirección NO-SE, que genera la mega-estructura de la Dorsal de Huincul (Fig. 1, Ploszkiewicz *et al.* 1984, Zavala y González 2001). Esta morfoestructura consiste en un sistema de fallas E-O a lo largo del paralelo de los 39° S, caracterizado por la presencia de estructuras compresivas, transcurrentes y transpresivas dextrales (Silvestro y Zubiri 2008), y está relacionada a una antigua sutura causada por la acreción de Patagonia contra Gondwana en el Pérmico Temprano (Mosquera y Ramos 2006). Posteriormente ocurren dos reactivaciones en el Terciario, una compresiva en el Mioceno, ortogonal al margen pacífico (de dirección E-O) y una extensional de edad pliocena (Folguera *et al.* 2007, Mosquera 2008, Mosquera *et al.* 2011).

Como consecuencia de la configuración estratigráfica de la cuenca, existen varios sistemas petroleros con múltiples rocas generadoras: Ciclo Precuyano (niveles pelíticos, Triásico Superior?-Jurásico Inferior), y formaciones Los Molles (Jurásico Inferior), Vaca

Muerta (Jurásico Superior) y Agrio (Jurásico Superior-Cretácico Inferior); y rocas reservorios: formaciones Lajas (Jurásico Medio), Lotena (Jurásico Medio-Superior), Tordillos-Sierras Blancas (Jurásico Superior), y Quintuco-Loma Montosa (Cretácico Inferior), entre otras (Cruz *et al.* 2002, Legarreta y Villar 2012). En el ámbito de la Dorsal de Huincul y en particular en el yacimiento Aguada Baguales, los niveles productivos corresponden a los grupos Cuyo y Lotena (Fig. 1c). La trampa consiste en truncaciones contra el sello regional (Formación Vaca Muerta), sin presencia de acumulaciones hacia la cresta del anticlinal a causa de una erosión total de este sello (discordancia Intravalanginiana, fig. 1c, Cevallos 2005, Pángaro *et al.* 2005).

### **Geología local**

El sector de estudio (Fig. 2) está caracterizado por una topografía de mesetas donde afloran las formaciones Cerro Lisandro (91-90 Ma, Turoniano Superior) y Portezuelo (90-86 Ma, Turoniano Superior-Santoniano Inferior, Legarreta y Gulisano 1989). Hacia el sector oriental del área de estudio se apoyan en concordancia las formaciones Plottier y Bajo de la Carpa. Estos afloramientos se encuentran ubicados sobre las estructuras de los yacimientos Aguada Baguales y Huincul, que son anticlinales de subsuelo de orientación E-O relacionados a fallas inversas de basamento (Fig. 1c), afectados por una componente de rumbo de tipo dextral que origina fallas extensionales perpendiculares al eje del anticlinal (Silvestro y Zubiri 2008). En superficie las sedimentitas del grupo Neuquén conforman amplios anticlinales de orientación ENE-OSO (Rodríguez *et al.* 2007), y están limitadas por dos lineamientos E-O en el sector norte y sur del prospecto (Fig. 2a).

La Formación Cerro Lisandro aflora en la base de la meseta (Fig. 4b) y consiste en una sucesión de pelitas y fangolitas de hasta ~70 m de espesor (Herrero Ducloux 1938), con intercalaciones de areniscas de grano fino a medio que aumentan su proporción hacia el techo

en arreglos granocrecientes. Se componen de arcillas (88%), cuarzo (10%), feldespatos (2%) y trazas de calcita (Pons *et al.* 2009).

La Formación Portezuelo está constituida por areniscas y conglomerados con una menor participación de niveles pelíticos (Fig. 4a). En el área de La Cuprosa aflora solo la sección inferior (Herrero Ducloux 1938). Para diferenciar las características sedimentológicas del perfil se realizaron 3 subdivisiones: inferior, media y superior.

La sección inferior (34 m) se caracteriza por una sucesión cíclica de litofacies de conglomerados y areniscas con laminación entrecruzada (Gt y St) de 0,3 a 2,5 m de espesor, con geometrías lenticulares y bases erosivas (Fig. 4a) y paleo-corrientes hacia el SSE (N190°, n=2). Intercalados en los anteriores hay bancos de areniscas con laminación entrecruzada de bajo ángulo (Sl) de grano medio a grueso, que gradan hacia arriba a bancos de areniscas masivas (Sm) de grano fino.

La sección media está compuesta por una sucesión espesa (11 m) de pelitas laminadas a masivas (Fsc), con una menor participación de bancos de conglomerados y areniscas con laminación entrecruzada (Gt y St) y areniscas con laminación paralela (Sh), que no sobrepasan los 50 cm de espesor.

En la sección superior (13 m) dominan bancos de conglomerados y de areniscas de grano medio y fino con laminación entrecruzada (Gt y St), y de areniscas masivas (Sm) con espesores de hasta 4 m y paleocorrientes en dirección N205°.

En todas las secciones los conglomerados son clasto sostenidos y están compuestos por granos de cuarzo, feldespatos y líticos intraformacionales de limolitas gris verdosas de 1 mm a 2 cm de diámetro, inmersos en una matriz de arena media. Las areniscas están formadas por clastos subangulosos, bien seleccionados de cuarzo monocristalino, policristalino y con extinción ondulosa, microclino, plagioclasa, y líticos ígneos, volcánicos (ácidos a

intermedios) y sedimentarios intraformacionales (limolitas). Como minerales accesorios hay biotita, muscovita, turmalina, zircón y magnetita.

## **RESULTADOS**

### **Alteración Regional**

A partir del análisis de imágenes satelitales se pudo obtener la distribución regional de la decoloración en las sedimentitas del Grupo Neuquén en el área que abarca Barda González, Cerro Challacó y el sector sur de Sierra Barrosa (Fig. 3). Las figuras 3c y d muestran el resultado de la combinación de cocientes 3/1, 5/4, 5/7, donde en colores rojos se indica la distribución de  $Fe^{3+}$  que se corresponde con los niveles de pelitas rojas de las formaciones Cerro Lisandro, Portezuelo y Plottier, y gran parte de las areniscas de la Formación Bajo de La Carpa. El color verde resalta la presencia de minerales con  $Fe^{2+}$ , y representa las areniscas y conglomerados decolorados de la Formación Portezuelo, y la base de la Formación Bajo de La Carpa (Figs. 3c, d). En colores turquesas y azules se muestra la distribución de los minerales arcillosos con iones hidroxilos. Los colores turquesas predominan en el flanco sur del Cerro Challacó, delimitados hacia el norte por un lineamiento de dirección NO-SE (Fig. 3c), y resaltan las formaciones Portezuelo, Plottier y Bajo de la Carpa, mientras que las tonalidades azules coinciden con la distribución de los sedimentos modernos al tope del Cerro Challacó y Sierra Barrosa. Estas observaciones concuerdan con la distribución de la decoloración (verde) y los óxidos de hierro (rojo) en la imagen con clasificación supervisada (Fig. 3b).

El trabajo de campo permitió distinguir con más detalle la distribución de esta alteración regional, donde se observaron intercalaciones de areniscas decoloradas dentro de los niveles pelíticos rojizos de las formaciones Cerro Lisandro y Plottier. Estos niveles rojizos

hacia el contacto con las areniscas cambian a coloraciones gris verdosas (Fig. 4b). La Formación Bajo de la Carpa presenta una variación desde sedimentitas decoloradas en la base, zonas con intercalaciones de sedimentitas decoloradas y con óxidos de hierro, y una predominancia de las últimas hacia el techo. En el sur del Cerro Challacó esta Formación exhibe una abundancia de secuencias pelíticas de color gris verdoso.

### **Distribución de las facies diagenéticas en el sector de la Cuprosa**

La Formación Cerro Lisandro muestra un cambio de color de rojo a gris verdoso en la base del perfil hacia el contacto con la Formación Portezuelo (Figs. 4a, b), indicando ausencia de cementos de óxidos de hierro férrico hacia el techo. La Formación Portezuelo presenta facies con colores blancos, grises, negros, rojos y anaranjados en las areniscas (St, Sl, Sm y Sh), negros en los conglomerados (Gt), y tonalidades gris verdosas y rojas en las pelitas (Fsc).

*Facies blancas:* Esta facies corresponde a areniscas decoloradas carentes de cementación temprana de hematita o calcita, y se encuentra bien distribuida a lo largo de todo el perfil (Fig. 4a). La mayoría de las areniscas decoloradas son friables, y se caracterizan por la escasez de cementos (< 1%) y trazas de bitumen. Los feldespatos y micas se encuentran fragmentados y alterados parcial a totalmente a caolinita (Pons *com. pers.*, fig. 5a) preferencialmente en sus superficies de clivaje. Los líticos volcánicos tienen su pasta reemplazada por caolinita, y los clastos de cuarzo presentan bordes corroídos y engolfamientos (detalle fig. 5d). Todos estos clastos alterados producto de la disolución generan una porosidad intragranular variable entre 0-40%, y una porosidad total de ~17,37 % (Cuadro 1). Un cemento incipiente de micro-cuarzo syntaxial se desarrolla en los granos de cuarzo, con cristales de entre 1-5  $\mu\text{m}$  de diámetro que pueden medir hasta 15  $\mu\text{m}$  de diámetro

(Fig. 5b), y un cemento circungranular de arcillas (esmectita?, Fig. 5a) tapiza los granos y el cemento previo.

En algunos niveles de areniscas hay trazas de pirita y bitumen. Ambos se encuentran cementando selectivamente en forma de nódulos (1 y 5 mm de diámetro), o diseminados homogéneamente (Figs. 4e, 5c). En los nódulos, la pirita es principalmente intersticial anhedral y con texturas coloformes, y raramente forma cristales euhedrales, mientras que cuando se encuentra diseminada desarrolla formas euhedrales a subhedrales poiquilíticas. Comúnmente la pirita está reemplazada parcial a totalmente por hematita-goethita (Fig. 5c), lo que le confiere localmente colores marrones a anaranjados, y en algunos casos se observa desarrollando la típica textura de *boxwork*. Un cemento tardío de analcima (<1%) distribuido en forma de motas aisladas de 1 a 3 mm de diámetro (Figs. 4f, 5e) rellena de forma incipiente la porosidad restante.

*Facies grises y negras:* Las facies grises y negras corresponden a areniscas con cemento carbonático irregularmente distribuido (Fig. 4c) y a conglomerados intensamente cementados por calcita (Fig. 4d). Las coloraciones grises a negras responden a la proporción de bitumen presente en estas facies. Las areniscas tienen concreciones calcáreas aisladas en las secciones inferior y superior, con formas ovaladas, esféricas y elipsoidales proladas de hasta 50 cm de largo (Fig. 4c). Muchas concreciones se encuentran con su eje mayor dispuesto paralelo a los planos de estratificación. En el interior de algunas concreciones los feldespatos y líticos volcánicos se encuentran mejor preservados que en las facies blancas, y la porosidad intragranular es menor. Los niveles de conglomerados están intensamente cementados por carbonato (Fig. 4d), el cual reemplaza parcial a totalmente los líticos pelíticos confiriéndoles una coloración blanco grisácea. La calcita (I) en ambas facies es límpida, poiquilítica, de grano grueso, desarrolla textura de clastos flotantes (Fig. 5b), y reemplaza a

los clastos a través de las fracturas y planos de exfoliación, disminuyendo la porosidad a ~4,74 y ~3,2 % (Cuadro 1). Esta calcita I presenta una fluorescencia rosa de intensidad débil al observarla con luz UV de onda corta y larga. En las concreciones, la calcita grada de calcita esparítica a calcita micrítica hacia el exterior. Los clastos de cuarzo exhiben también sobrecrecimiento sintaxial de micro-cuarzo, confiriéndoles un aspecto anguloso. La preservación de formas euhedrales de micro-cuarzo en contacto neto con la calcita (I) indica la posterioridad de este cemento (detalle fig. 5b).

El bitumen se encuentra mayormente distribuido en las facies conglomerádicas y en las areniscas de la sección superior, y en menor medida en las areniscas de la sección inferior y media en forma de motas diseminadas aisladas de hasta 2 mm de diámetro o demarcando la estratificación. En las areniscas de la sección superior, las trincheras de La Cuprosa (Fig. 2b) exponen dos niveles subhorizontales ricos en bitumen, con formas lenticulares de hasta 1 m de espesor y 20.000 m<sup>2</sup> de extensión, que tiñen las sedimentitas de color negro y obturan la porosidad (Figs. 4g, 6a, b). Aquí el bitumen se encuentra constituyendo tubos verticales cilíndricos (Fig. 6c), con formas de hongos, plumas de hasta 30 cm de diámetro, y formas nodulares esféricas y lenticulares (Figs. 6a, b). Existen juegos de fracturas que interconectan las lentes de bitumen de tipo curvas y anastomosadas, y en algunos casos irradian desde los ápices de las impregnaciones de bitumen conformando zonas de fracturas planas, cónicas y lenticulares (Fig. 6b, d). El bitumen presenta color negro, gris, marrón claro y marrón oscuro, y se encuentra tapizando los clastos (Figs. 5b, d). En las concreciones calcáreas, niveles conglomerádicos cementados, y líticos pelíticos reemplazados por carbonatos (calcita I), forma texturas dendríticas alrededor de ellos y grada de ~1-2 % a ~80 % desde el centro a la periferia, indicando la posterioridad del emplazamiento de hidrocarburo (Fig. 4c).

Las zonas con bitumen están asociadas a una calcita II (Fig. 5d) rica en impregnaciones de bitumen e inclusiones fluidas orgánicas (calcita barroca). La pirita también

es frecuente en estas facies, cementando poiquilíticamente, incluida en la calcita II y tapizando fracturas de clastos, generalmente alterada a hematita+goethita.

Vetillas subparalelas de calcita granular límpida (III) de 1 a 0,2 mm cortan al bitumen y cementos previos, incluyen islas de calcita barroca (II) y rellenan fracturas de clastos. Esta calcita (III) presenta una fluorescencia amarillo pálido de intensidad moderada, al observarla con luz UV de onda corta y larga.

*Facies rojas y anaranjadas:* Si bien la mayoría de las rocas exhiben la típica decoloración por ausencia de óxidos e hidróxidos de hierro, existen también en la sección media y superior areniscas con coloraciones rojas y anaranjadas (Fig. 4h). Las trincheras de La Cuprosa muestran una gradación lateral desde facies negras (niveles de bitumen), facies blancas con motas de piritita, a facies rojas y anaranjadas ausentes de bitumen (Fig. 6g). Esta facies presenta también motas aisladas de cemento de analcima (Figs. 4f, 5e). Hematita+goethita reemplazan los líticos pelíticos, tapizan los clastos y rellenan fracturas que cortan al cemento de analcima y a los clastos, disminuyendo la porosidad en un ~4 %.

### **Petrografía de inclusiones fluidas**

Las inclusiones fluidas observadas en todas las facies pueden dividirse en tres asociaciones según el mineral hospedante y características generales.

Una asociación de inclusiones fluidas hospedadas en clastos de cuarzo comprende las inclusiones heredadas.

Una asociación de inclusiones fluidas secundarias (1 a 8  $\mu\text{m}$  de diámetro) están asociadas a fracturas selladas en clastos de cuarzo (Figs. 7a, b), que cortan incluso al cemento sintaxial de micro-cuarzo. Dentro de esta asociación existen tres tipos de inclusiones: unas bifásicas ricas en líquido (IIa, fig. 7a), con formas ovoides a irregulares y burbuja móvil

(grado de relleno de la fase líquida, L: 0,95 hasta 0,7), otras bifásicas ricas en vapor (IIb, fig. 7b), con burbujas con fenómenos de adherencia (L: 0,7 hasta 0,5), y un tercer tipo monofásicas (Ia, fig. 7a) ovoides a irregulares, con tonalidades amarillas, castañas y negras de relieve alto. Las inclusiones fluidas de tipo IIa y IIb tienen un relieve medio a bajo. Esta asociación de inclusiones fluidas está alineada con inclusiones sólidas de pirita anhedral (Fig. 7c), que van de 1 a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro y pueden llegar a medir hasta 100  $\mu\text{m}$  de largo.

Otra asociación de inclusiones fluidas hospedadas en calcita barroca (II) agrupa a inclusiones de tipo IIa, IIb y Ia. Estas se encuentran como inclusiones primarias alineadas demarcando planos de crecimiento de cristales de la calcita (Fig. 7d), y asociadas a impregnaciones de bitumen. Similar asociación de inclusiones fluidas de origen secundario se observaron formando alineaciones que cortan a la calcita II y continúan en algunos casos en los clastos de cuarzo.

### **Mineralización**

La mineralización de Cu se hospeda en las facies grises y negras del sector superior del perfil relevado, en contacto con los dos niveles ricos en bitumen (trincheras de La Cuprosa, figs. 4g, 6a, b), lo que le confiere a las rocas coloraciones verdes a verdes turquesas. También hay mineralización supergénica de Cu incipiente (<1 %) en un nivel de conglomerado de la sección media del perfil (Fig. 6e). Por encima del nivel superior, las areniscas presentan tubos verticales y nódulos esféricos de bitumen de hasta 10 cm de diámetro, rodeados por mineralización de Cu formando halos de 1-5 cm de espesor. En todas las zonas la mineralización se encuentra en contacto con bitumen. En las concreciones carbonáticas es donde mejor se aprecia la secuencia de cementos: calcita I domina en el interior de la concreción, calcita II y bitumen hacia el borde externo, y en contacto con el bitumen la mineralización de Cu.

La mineralización consiste en azurita, malaquita, brochantita? y crisocola intersticial que cementan las sedimentitas, rellenan la porosidad primaria y secundaria y reemplazan parcial a completamente los cementos previos, disminuyendo la porosidad a ~2,5 % (Cuadro 1). Solo se hallaron trazas de calcopirita rodeada por minerales supergénicos de Cu (Fig. 8a) en una muestra de la sección superior del perfil.

La azurita se encuentra localmente cementando en forma de motas de 0,5-2 cm de diámetro (Figs. 6f, 8b, c). Esta azurita rellena las fracturas de los clastos, incluye poiquilíticamente a los clastos y cementos previos y reemplaza a la calcita previa. La malaquita y brochantita? se encuentran formando cristales anhedrales fibrosos a microgranulares, reemplazando a las calcitas previas, incluyendo poiquilíticamente los clastos, motas de bitumen y hematita post-pirita, y formando vetillas que cortan a las motas de azurita (Fig. 8c).

La crisocola rellena el espacio poral restante en hábito botroidal, microgranular y/o fibroradiado circungranular (Fig. 8d), reemplaza selectivamente a los minerales arcillosos previos, y forma vetillas que cortan las zonas de bitumen y azurita. Las zonas con bitumen y minerales supergénicos de Cu presentan halos periféricos de óxidos e hidróxidos de hierro de hasta 1 cm de espesor, al igual que los nódulos de pirita.

## **DISCUSIÓN**

### **Configuración de facies y migración de fluidos**

Los estudios sedimentológicos en la Fm. Portezuelo realizados por Garrido (2000) en el área de Sierra de Portezuelo y Sierra Barrosa sugieren sistemas fluviales de alta sinuosidad, de tipo meandroso y carga arenosa dominante, depositados bajo condiciones climáticas cálidas; mientras que las observaciones de Sanchez *et al.* (2008) en el sector norte del lago

Los Barreales establecen para la sección superior el desarrollo de canales fluviales entrelazados gravosos y de carga mixta de baja y alta sinuosidad, culminando con un sistema fluvial de carga mixta de alta sinuosidad. Las interpretaciones de elementos arquitecturales a partir del perfil relevado (sección inferior de la Fm. Portezuelo, fig. 4a) confirman un ambiente fluvial, donde existe un tramo inferior y superior con predominancia de depósitos de relleno de canal con barras gravosas (litofacies Gt) y formas de lecho arenosas (litofacies St, Sm y Sl), y un tramo medio que constituye llanuras de inundación (litofacies Fsc) con una menor participación de canales, barras gravosas, y mantos de arena laminados (Gt, St, Sm y Sh), generados durante períodos de alta descarga y desborde del canal principal (Miall 1978). A través de las asociaciones de facies observadas en este y en otros perfiles relevados en zonas cercanas al prospecto, se infiere un ambiente fluvial de tipo entrelazado, al igual que las interpretaciones de Pons *et al.* (2015) para la Formación Portezuelo.

La configuración de facies en la Formación Portezuelo fue condicionante para la migración de fluidos post-depositacionales (aguas meteóricas, aguas de formación, hidrocarburos, fluidos con Cu), que siguieron las litofacies más permeables Gt, St, Sl, Sm y Sh (Fig. 9). El pasaje de diferentes fluidos queda evidenciado en la secuencia de cementos descripta (Fig. 10) y su distribución espacial, con los máximos porcentajes de bitumen, calcita y mineralización en el nivel superior (trincheras de La Cuprosa, fig. 4a). Esta distribución heterogénea de la mineralización y bitumen surge como un interrogante que podría explicarse a través de la migración tortuosa de fluidos en reservorios fluviales (C. Zavala *com. pers.*, fig. 9b). Esta migración es producto de la interconexión de canales a través de depósitos de lóbulo frontal (migración lateral entre canales) y superficies erosivas (migración vertical), mientras que las secuencias pelíticas constituyen barreras para el pasaje de fluidos. La sucesión pelítica (~20 m) de la sección media de la Formación Portezuelo que suprayace estos niveles mineralizados, podría haber funcionado como trampa estratigráfica para los fluidos.

### **Diagénesis temprana**

Posterior a la depositación comienza el enterramiento y compactación progresiva de la Formación Portezuelo, junto a la cementación temprana de hematita que produjo el enrojecimiento (*reddening*) regional de las sedimentitas del Grupo Neuquén, a causa de la circulación de aguas meteóricas oxidantes durante la diagénesis temprana (Brown 2005, Walker 1976). Las aguas meteóricas extraen el Fe de la alteración de minerales detríticos ricos en Fe (mafitos), feldespatos y arcillas, y producen este cemento temprano de hematita. Esta cementación sólo se preserva en los estratos rojos pelíticos de la Formación Cerro Lisandro (Fig. 4b), en ciertos niveles pelíticos de la Formación Portezuelo, en la Formación Plottier, y en gran parte de las areniscas de la Formación Bajo de La Carpa (Fig. 3, 9a). Las reacciones de hidrólisis por la interacción de las aguas meteóricas con los líticos y feldespatos produjeron su reemplazo por caolinita, durante la diagénesis temprana (Keller 1970).

Teniendo en cuenta la presencia de bitumen en la Formación Portezuelo, la calcita I (Fig. 5b) en las concreciones de las areniscas y conglomerados (facies grises y negras, figs. 4c, d) puede interpretarse como producto de la oxidación temprana de hidrocarburos durante su migración a superficie y ascenso de CO<sub>2</sub> a través de fracturas (Schumacher 1996). La mezcla de CO<sub>2</sub> con aguas meteóricas produce la saturación en bicarbonato y la posterior precipitación de calcita I, que reemplaza clastos y forma texturas de clastos flotantes. Esta calcita I obtura la porosidad casi en su totalidad, y consecuentemente la permeabilidad de las rocas. Las concreciones carbonáticas son comunes en los halos de alteración asociados a migración de hidrocarburos, también conocidos como HIDAs (*Hydrocarbon Induced Diagenetic Aureoles*, Lilburn & Al Shaieb 1984). Estos halos comúnmente gradan desde zonas centrales con cemento carbonático y pirita, a areniscas decoloradas, y areniscas sin alterar hacia la periferia (Schumacher 1996). Otra hipótesis no descartada es la generación de

esta calcita I a partir de acuíferos saturados en carbonatos, al igual que las calcitas I y II descritas por Pons *et al.* (2013a) para el área de Barda González. Donde describe la textura de clastos flotantes de la calcita I como indicio de una cementación a poca profundidad, y las estructuras de *Microcodium* globulares (ausentes en el área de estudio) en la calcita II como evidencias de exposición sub-aérea.

### **Ingreso de hidrocarburos**

El incipiente sobrecrecimiento sintaxial de cuarzo en forma de micro-cuarzo (Fig. 5b) para esta Formación que solo alcanzó la diagénesis temprana (<1000m, Pons *et al.* 2015) puede ser explicado como producto de: (1) la introducción de fluidos (aguas de formación y/o hidrocarburos) de subsuelo con temperaturas mayores a 70°C (Bjørlykke & Egeberg 1993) que provocaron la removilización de silicio en la roca adyacente para formar el micro-cuarzo, o (2) la precipitación a poca profundidad y bajas temperaturas, a causa de la exposición intermitente a las aguas meteóricas o a fluctuaciones del nivel freático, que genera intensa evaporación y produce la saturación de sílice (Kelly *et al.* 2007, Thiry *et al.* 1988). Para confirmar una de las dos hipótesis habría que realizar estudios de inclusiones fluidas e isótopos estables.

La preservación de formas euhedrales de cuarzo sintaxial en contacto neto con la calcita I (Fig. 5b) indican que este cuarzo es posterior a dicha calcita, dado que las condiciones de precipitación de la calcita (pH >7) generarían disolución de cuarzo (Bjørlykke & Egeberg 1993).

El ingreso posterior de fluidos ricos en hidrocarburos afectó a todas las facies permeables, concentrándose mayormente en las facies grises y negras del nivel superior y en los conglomerados. Este hidrocarburo generó reacciones redox que provocaron: (1) la formación de ácidos orgánicos (CH<sub>3</sub>COOH) y disminución de pH, (2) la disolución de

cementos previos (óxidos e hidróxidos de hierro, calcita I y micro-cuarzo) y clastos a causa de la interacción con estos ácidos, (3) la alteración de feldespatos y líticos a minerales arcillosos y la generación del cemento circungranular de arcilla (esmectita?, Pons *et al.* 2015), (4) la precipitación de pirita a expensas de la hematita temprana (pasaje de  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$ ), y calcita II, y (5) el aumento de la permeabilidad a causa de la disolución de cementos, que favoreció la circulación del fluido a través de las rocas (Surdam *et al.* 1989, 1993). Los datos de mediciones de porosidad muestran altos valores para las facies blancas (17,37 %, cuadro 1), a causa de la escasez de cementos.

Las impregnaciones de bitumen alrededor de las concreciones de calcita I (Fig. 4c), y la preservación de la porosidad intragranular dentro de las mismas (carencia de disolución), son evidencias de la posterioridad del emplazamiento de hidrocarburo. Las fluctuaciones de  $CO_2$  y pH dadas por las reacciones redox producen la disolución de la calcita I y cemento de micro-cuarzo (Fig. 5d), y la precipitación de calcita II. La presencia de abundantes inclusiones fluidas bifásicas primarias (IIb, fig. 7d) con burbujas con fenómenos de adherencia en esta calcita (II), revela un entrapamiento heterogéneo (Roedder 1984), constituido por un fluido acuoso y uno de origen orgánico (Levorsen 1973). La existencia de estas inclusiones fluidas orgánicas en la calcita (II) indicaría que durante su formación los poros de las areniscas estaban saturados en hidrocarburos. Estas mismas asociaciones pero de tipo secundarias son observadas en clastos de cuarzo (Figs. 7a, b), y son interpretadas como contemporáneas con las inclusiones fluidas primarias de la calcita II, al igual que las descritas por Pons *et al.* (2015) para la misma Formación en el prospecto Barda González.

La pirita intersticial asociada a bitumen y las inclusiones sólidas de pirita alineadas con inclusiones fluidas orgánicas (Fig. 7c), son evidencias de que el hidrocarburo actuó como fuente reductora. Donde las fuentes de S pudieron haber sido: (1) las salmueras que migran

con el hidrocarburo, (2) el mismo hidrocarburo, o (3) las aguas de formación del Grupo Neuquén ricas en sulfatos (Pons *et al.* 2009, 2015).

### **Alteración regional**

La alteración previamente descrita ha sido observada a escala regional para el área de estudio, en los niveles más permeables de las formaciones Cerro Lisandro, Portezuelo y Plottier que se encuentran totalmente decolorados (*bleaching*) y coinciden con el canal verde de las imágenes de las figuras 3c y d.

La zona del flanco sur del Cerro Challacó constituye un caso particular, donde al sur del lineamiento NO-SE (Fig. 3c), las formaciones Portezuelo, Plottier y Bajo de La Carpa exhiben respuestas turquesas (Figs. 3c y d) debido a la abundancia de pelitas verdes grisáceas que indican ausencia de óxido férrico. Esta alteración en todos los niveles permeables e incluso en las secuencias pelíticas, sugiere que en el flanco sur del Cerro Challacó hubo una intensa circulación de fluidos reductores (Fig. 9a). Teniendo en cuenta la flotabilidad de los hidrocarburos, estos fluidos se habrían acumulado hacia la cresta del anticlinal ENE-OSO ubicado al sur del área de estudio, por encima del yacimiento Huincul (Fig. 9a).

La ausencia del sello regional (Fm. Vaca Muerta) en el anticlinal sobre el yacimiento Aguada Baguales a causa de la discordancia Intravalanginiana (~126 Ma), revelaría que esta estructura pudo funcionar como el principal conducto de migración para el hidrocarburo (Fig. 9a). Análisis cromatográficos de dos muestras de bitumen de la Formación Portezuelo en el prospecto aledaño Barda González, indican una afinidad con los hidrocarburos de la Formación Vaca Muerta (Pons *et al.* 2015). Esta Formación está térmicamente inmadura en esta zona de la Dorsal de Huincul, por lo tanto el vector de migración más probable hacia el Grupo Neuquén sería lateral, desde las posiciones generadoras al norte (Cruz *et al.* 2002, fig. 9a). La edad de generación y expulsión de petróleo para el norte comenzó a los ~80 Ma,

controlada por la subsidencia provocada por la sedimentación del Grupo Neuquén (Villar *et al.* 2005). Sin embargo, no se descarta que las pelitas de la Formación Los Molles también pudieron haber cargado los reservorios someros, dado que entraron en ventana de generación de petróleo y gas a los 130 y 94 Ma respectivamente, en la zona del Engolfamiento (Cruz *et al.* 2002).

Las impregnaciones de bitumen ya han sido descritas en las sedimentitas del Grupo Neuquén como evidencias de conexión entre éstas y las rocas reservorios y/o rocas generadoras a través de las fallas de la Dorsal de Huincul (Giusiano *et al.* 2006, 2008, 2009, Pons *et al.* 2009, 2011, 2013b, 2014, 2015). La alteración y facies diagenéticas características de la migración de hidrocarburos también han sido estudiadas en varias zonas hidrocarburíferas de la Cuenca Neuquina (Franchini *et al.* 2014, Paz *et al.* 2014, Pons *et al.* 2015, Rainoldi 2015, Rainoldi *et al.* 2012, 2014) y del mundo (Beitler 2003, Beitler *et al.* 2005, Donovan 1974, Garden *et al.* 2001, Lilburn & Al Shaieb 1983, 1984, Parry *et al.* 2009, Schumacher 1996).

### **Mineralización y telogénesis**

En La Cuprosa la mineralización está hospedada en las areniscas (St) decoloradas del tramo superior de la sección inferior de la Fm. Portezuelo, siempre en contacto con bitumen, al igual que en el prospecto Barda González. Si bien en La Cuprosa la mayor parte de la mineralización es de tipo supergénica (malaquita>crisocola>azurita>brochantita?), se observaron trazas de calcopirita de grano muy fino relíctica dentro de estos minerales supergénicos (Fig. 8a).

La gradación vertical y horizontal desde areniscas con bitumen y mineralización de Cu (facies negras y grises), a areniscas decoloradas (facies blancas), y areniscas con óxidos e hidróxidos de hierro (facies rojas y anaranjadas, fig. 6g), sugiere zonación con una relación

Cu/Fe decreciente hacia afuera de la trampa reductora (bitumen). Esta zonación de decenas de metros no se corresponde con la típica secuencia hematita, calcosina, bornita, calcopirita y pirita observada en numerosos depósitos de Cu hospedados en rocas sedimentarias del mundo (Hitzman *et al.* 2005), dada la ausencia de cantidades significativas de minerales hipogénicos. El hecho de que La Cuprosa presenta siempre aureolas de óxidos e hidróxidos de hierro periféricas a las zonas mineralizadas (Fig. 6g), estaría indicando posiblemente que parte de esas aureolas son producto de la removilización del hierro de la pirita previa durante su reemplazo por minerales de Cu (Brown 1984, Oszczepalski 1989). Esta característica se puede utilizar como guía de prospección local dentro del prospecto.

La exhumación de estos afloramientos del Grupo Neuquén en el Mioceno (Mosquera *et al.* 2011) produjo (1) la alteración de esmectita a analcima (alta concentración de sodio), (2) la disolución y re-precipitación de calcita (III) en forma de vetillas, cuya diferente respuesta a la fluorescencia estaría indicado diferencias composicionales (Gies 1975, Bissig *et al.* 2007), y (3) la alteración supergénica de los nódulos de pirita por hematita+goethita, y de los sulfuros de Cu por azurita, malaquita, brochantita y crisocola. Esta alteración supergénica disminuyó la porosidad de 17,37 % (facies blancas), a 13,46 % para las areniscas con óxidos e hidróxidos de hierro (facies rojas y anaranjadas), y 2,5 % para las areniscas con mineralización supergénica de Cu y bitumen (facies grises con mineralización, cuadro 1).

La gran abundancia de minerales carbonáticos supergénicos de Cu y carencia de minerales hipogénicos sugiere una intensa circulación de aguas meteóricas oxidantes de pH neutro a alcalino, que reemplazó la mena previa (Sillitoe 2005). Las relaciones de corte entre los minerales supergénicos indican una secuencia de cementos de azurita reemplazada por malaquita y brochantita, y crisocola que rellena el espacio restante. La interacción de los carbonatos previos con las aguas meteóricas produjo un aumento en la fugacidad del CO<sub>2</sub>, y la consecuente precipitación de azurita. Al disminuir la disponibilidad de CO<sub>2</sub> la azurita fue

reemplazada por malaquita y brochantita? subordinada probablemente debido a la baja concentración de  $\text{SO}_4$  (Woods and Garrels 1986). Los mismos fluidos neutros a alcalinos generaron el reemplazo de los clastos y cementos previos por crisocola, en condiciones de elevadas concentraciones de sílice (Sillitoe 2005).

### **Modelo genético y comparación con otros depósitos de Cu**

De acuerdo a las características anteriormente descritas, donde la mineralización está hospedada en rocas clásticas continentales decoloradas dentro de la secuencia de estratos rojos del Grupo Neuquén, La Cuprosa constituye un depósito de Cu estratiforme hospedado en rocas sedimentarias de tipo *red-bed* (Kirkham 1989). La configuración estratigráfica y estructural de la cuenca Neuquina reúne características similares a las observadas en numerosos depósitos de Cu hospedados en rocas sedimentarias (Hitzman *et al.* 2005 y referencias allí citadas), dado que presenta grandes espesores de estratos rojos (formaciones Tordillos y Rayoso, y Grupo Neuquén) y rocas ígneas (Grupo Choiyoi y Ciclo Precuyano), que pueden ser fuente de metales. La alteración de los minerales lábiles en estas rocas pudo liberar cationes de Fe y Cu, proceso intrínsecamente relacionado con la evolución de aguas meteóricas y el enrojecimiento de los estratos rojos (Brown 2005). Cantidades adicionales de Cu pudieron haber sido liberadas también por la cristalización de hematita a partir del pigmento de goethita inicial de los estratos rojos (Brown 1984). Las fuentes del S pudieron ser similares a las descritas para la pirita asociada al ingreso de hidrocarburos (Pons *et al.* 2009, 2014).

El transporte del Cu se da en presencia de una salmuera oxidante, de pH neutro, rica en cloruros y de baja temperatura (Rose 1976, 1989). Estas salmueras se generan durante la circulación de aguas meteóricas a través de los estratos rojos y evaporitas subyacentes (formaciones Tábanos, Auquilco y Huitrín), que pudieron suministrar metales y Cl,

respectivamente. Esta recarga y circulación de fluidos debió ser a nivel cuencial (Fig. 9a), con el ingreso de aguas meteóricas desde las zonas topográficamente altas al oeste (Cordillera de los Andes) y este (*peripheral bulge*, Di Giulio *et al.* 2012). Estos fluidos se canalizaron y ascendieron a través de las mismas vías de migración utilizadas por los hidrocarburos: las fallas de la Dorsal de Huincul en profundidad, y los lineamientos de la Formación Portezuelo en zonas subsuperficiales (Figs. 2a, 9a). Similares características fueron descritas para otros prospectos de Cu como Barda González, Tordillos y El Porvenir (Dorsal de Huincul), y Sapo Sur (Dorso de los Chihuidos, Pons *et al.* 2009, 2013b, Rainoldi 2015), con fallas que afectan al basamento y que fueron reactivadas durante la orogenia andina.

Las relaciones de contacto entre la mineralización de Cu y el bitumen indicarían que el bitumen constituyó un frente reductor para los fluidos que transportaron Cu en solución y provocaron su precipitación, al igual que en los demás prospectos de Cu hospedados en rocas del Grupo Neuquén. Si bien en La Cuprosa no se preservaron los minerales hipogénicos, en otros prospectos de la cuenca Neuquina (Barda González, Tordillos y Sapo Sur) se han descrito bornita, calcopirita y minerales del grupo de la calcosina (Pons *et al.* 2009, 2013b, 2014, Rainoldi 2015). En Tordillos y Sapo Sur se mencionan también minerales supergénicos de vanadio y uranio (Pons *et al.* 2013b, 2014).

## CONCLUSIONES

La secuencia paragenética (Fig. 10) en el sector del prospecto La Cuprosa queda conformada de la siguiente manera: (1) el enrojecimiento (*reddening*) de las sedimentitas y alteración de feldspatos y líticos a caolinita, por la acción de aguas meteóricas durante la diagénesis temprana, (2) la precipitación de calcita I en los niveles más permeables (conglomerados y areniscas), posiblemente como resultado de la oxidación temprana de

hidrocarburos en subsuelo y ascenso de CO<sub>2</sub> a través de fracturas, (3) el sobrecrecimiento sintaxial de micro-cuarzo en los clastos, (4) la migración de hidrocarburos y sus reacciones redox con la roca, que produjeron: (a) la disolución de cementos previos (calcita I y hematita temprana), (b) la precipitación de calcita II (con inclusiones orgánicas) y pirita, (c) la alteración de los feldespatos y líticos y generación del cemento circungranular de arcilla (esmectita?), y (d) la disolución de los clastos de cuarzo (bordes corroídos y engolfamientos) y cementos previos, aumentando la porosidad de la roca a un ~17,37%; y (5) el ingreso de salmueras con Cu, que en contacto con el hidrocarburo precipitaron calcopirita y removilizaron el hierro de la pirita previa hacia la periferia. La exhumación del Grupo Neuquén en el Mioceno favoreció (6) la alteración de la esmectita? y generación del cemento de analcima, (7) la precipitación de calcita III, y (8) la alteración supergénica de los sulfuros de Fe y Cu (hematita> goethita y malaquita> crisocola> azurita> brochantita?).

La distribución de la decoloración (*bleaching*) en los mapas confeccionados (Figs. 3, 9) puede ser usada como un elemento de análisis para el estudio de migraciones de hidrocarburos y como guía para la exploración de depósitos de Cu similares en otros sectores de la Cuenca Neuquina.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue realizado en el marco de una “Beca Estímulo a las Vocaciones Científicas” del Consejo Interuniversitario Nacional, dentro de los proyectos FONCyT PICT-1120 y PICT-07/2608, y una “Beca para la finalización de trabajos finales de grado”, financiada por la Asociación Geológica Argentina. Se agradece por el apoyo brindado al Grupo Patagónico de Estudios Metalogénicos, al Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (UNRN), a la empresa AMA Resources por permitirnos entrar al prospecto, y se

agradecen las observaciones críticas de Lic. María Cecilia Cábana, Dra. Marta Franchini, Lic. Martín Cevallos, Dra. Nora Cesaretti y Dra. Ana Laura Rainoldi.

## **LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

Beitler, B., Parry, W.T. and Chan, M.A. 2003. Bleaching of Jurassic Navajo Sandstone on Colorado Plateau Laramide highs: Evidence of exhumed hydrocarbon supergiants?. *Geology* 31: 1041-1044.

Beitler, B., Parry, W.T. and Chan, M.A. 2005. Fingerprints of fluid flow: Chemical diagenetic history of the Jurassic Navajo Sandstone, Southern Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research* 75: 547–561.

Bissig, T., Donosco, D., Guerra, N. y Dipple, G.M. 2007. Carbonatos en vetas en el distrito epitermal de baja sulfuración de El Peñón, II Región, Chile: ambiente de formación e implicancias para la exploración. *Revista Geológica de Chile* 34 (2): 291-303.

Bjørlykke, K. and Egeberg, P.K. 1993. Quartz cementation in sedimentary basins. *AAPG Bulletin* 77: 1538–1548.

Brown, A.C. 1984. Alternative sources of metals for stratiform copper deposits. *Precambrian Research* 25: 61-74.

Brown, A.C. 2005. Refinements for footwall red-bed diagenesis in the sediment hosted stratiform copper deposits model: *Economic Geology* 100: 765-771.

Cazau, L.B. y Uliana, M.A. 1973. El Cretácico superior continental de la Cuenca Neuquina. V° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 131-163.

Cevallos, M.F. 2005. Análisis estratigráfico de alta frecuencia del límite kimmeridgiano-tithoniano en el subsuelo de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina. *Petrotecnia*, Diciembre 2005: 34-55.

Chica-Olmo, M. 2002. Development of a decision support system based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain. *Intl. Journal Remote Sensing* 23 (22): 4801–4814.

Chuvieco, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp S.A., 453 p., Madrid.

Cruz, C., Boll, A., Gómez Omil, R., Martínez, E., Arregui, C., Gulisano, C., Laffitte, G. y Villar, H. 2002. Hábitat de hidrocarburos y sistemas de carga Los Molles y Vaca Muerta en el sector central de la Cuenca Neuquina, Argentina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas CD 20 pp., Mar del Plata.

Di Giulio, A., Ronchi, A., Sanfilippo, A., Tiepolo, M., Pimentel, M. y Ramos, V.A. 2012. Detrital zircon provenance in the Neuquén basin (south-central Andes): Sedimentary response to the Cretaceous geodynamic evolution of a retroarc-foreland basin. *Geology* 40(6): 559-562.

Digregorio, J.H. y Uliana, M. 1980. Cuenca Neuquina. En: J.C. Turner (ed.), 2° Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias: 985-1032, Córdoba.

Donovan, T. J. 1974. Petroleum microseepage at Cement, Oklahoma—evidence and mechanisms. *AAPG Bulletin* 58: 429–446.

Erhart, H. 1956. La genèse des sols entant que phénomène géologique. Esquisse d'une théorie géologique et géochimique. Biostasie et rhexistasie. *Coll Evolution des Sciences*, n° 8 Ed. Masson et Cie., 90 p., Paris.

Fernández Aguilar, R. 1945. Los yacimientos de areniscas cupríferas del Neuquén. Dirección de Minas, Geología e Hidrología, Publicación 58: 1-27.

Franchini, M., Rainoldi, A. L., Pons, M.J., Giusiano, A., Impiccini, A., Cesaretti, N., Beaufort, D. and Patrier, P. 2014. Trazadores diagenéticos de las paleomigraciones de

hidrocarburos en las areniscas rojas cretácicas del Grupo Neuquén, Cuenca Neuquina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Tomo 1: 203-222, Mendoza.

Folguera, A., Introcaso, A., Giménez, M., Riuz, P.M., Tunstall, C., García Morabito, E. y Ramos, V.A. 2007. Crustal attenuation in the Southern Andean retroarc (38° - 39° 30' S) determined from tectonic and gravimetric studies: The Lonco-Luán asthenospheric anomaly. *Tectonophysics* 439: 129-147.

Garden, I.R., Guscott, S.C., Burley, S.D., Foxford, K.A., Walsh, J.J and Marshall, J. 2001. An exhumed palaeo-hydrocarbon migration fairway in a faulted carrier system, Entrada Sandstone of SE Utah, USA. *Geofluids* 1: 195-213.

Garrido, A.C. 2000. Estudio estratigráfico y reconstrucción paleoambiental de las secuencias fosilíferas continentales del Cretácico Superior en las inmediaciones de Plaza Huinul, provincia del Neuquén. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Córdoba (inédita), 78 pp., Córdoba.

Garrido, A.C. 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista Museo Argentino de Ciencias Naturales* 12 (2): 121-177.

Gies, H. 1975. Activation possibilities and geochemical correlations of photoluminescing carbonates, particularly calcites. *Mineralium Deposita* 10: 216-227.

Giusiano, A., Franchini, M., Impiccini, A. y O` Leary, S. 2006. Mineralización de Cu asociada a bitumen en las areniscas cretácicas, prospecto Barda González, Neuquén, Argentina. 11° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 255-258, Antofagasta.

Giusiano, A., Franchini, M.B., Impiccini, A. y Pons, M.J. 2008. Mineralización de Cu en sedimentitas Mesozoicas del Grupo Neuquén y hábitat de los hidrocarburos en la Dorsal de Huinul Neuquén. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 769-770, Salta.

Giusiano, A., Franchini, M.B., Pons, M.J. y Impiccini, A. 2009. Mineralización de Cu en el Grupo Neuquén asociada a la presencia de hidrocarburos, Dorsal de Huincul, Neuquén, Argentina. 9° Congreso Argentino de Geología Económica, Actas: 53-58, San Fernando del Valle de Catamarca.

Gulisano, C.A. 1981. El ciclo cuyano en el norte de Neuquén y sur de Mendoza. 8° Congreso Geológico Argentino 3: 573-592, San Luis.

Herrero Ducloux, A. 1938. Reconocimiento de la zona situada entre la vía férrea, el río Neuquén y el meridiano de Plaza Huincul. Yacimientos Petrolíferos Fiscales (inédito), 23pp.

Hiztman, M., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J. y Selly, D. 2005. The Sediment-Hosted Stratiform Copper Ore System. Economic Geology 100th Anniversary Volume: 609-642.

Keller, W.D. 1970. Environmental aspects of clay minerals. Journal of Sedimentary Petrology 40: 788-813.

Kelly, J. L., Fu, B., Kita, N. T. and Valley, J. W. 2007. Optically continuous silcrete quartz cements of the St. Peter Sandstone: High-precision oxygen isotope analysis by ion microprobe. Geochimica et Cosmochimica Acta 71: 3812–3832.

Kirkham, R V. 1989. Distribution, settings, and genesis of sediment-hosted stratiform copper deposits. Geological Association of Canada Special Paper 36: 3-38. Leanza, H.A., Hugo, C.A. y Repol, D. 2001. Hoja Geológica 3969-I, Zapala. Provincia del Neuquén. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 275, 128 pp, Buenos Aires.

Legarreta, L. y Uliana, M. A. 1996. La sucesión jurásica en el centro-oeste de Argentina. Arreglo estratigráfico, secuencias y evolución paleogeográfica”. Boletín de Informaciones Petroleras 45, 3ra. época: 66-78.

Legarreta, L. y Uliana, M. A. 1999. El Jurásico y Cretácico de la Cordillera Principal y la cuenca Neuquina. Facies sedimentarias. En Caminos, R. (ed) Geología Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29 (16): 399-416.

Legarreta, L. y Villar, H.J. 2012. Las facies generadoras de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina. *Petrotecnia*, Agosto 2012: 14-42.

Levorsen, A.I. 1973. Geología del petróleo. EUDEBA, 452 pp., Buenos Aires.

Lilburn, R. A., and Al-Shaieb, Z. 1983. Geochemistry and isotopic composition of hydrocarbon-induced diagenetic aureole (HIDA), Cement, Oklahoma. *Oklahoma City Geological Society Shale Shaker* 34 (4), pt. I: 40–56.

Lilburn, R. A., and Al-Shaieb, Z. 1984. Geochemistry and isotopic composition of hydrocarbon-induced diagenetic aureole (HIDA), Cement, Oklahoma. *Oklahoma City Geological Society Shale Shaker* 34 (5), pt. II: 57–67.

Lyons, W. A. 1999. Las areniscas cupríferas del Neuquén. En Zappettini, E.O. (ed.) Recursos Minerales de la República Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 1149-1158, Buenos Aires.

Miall, A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In Miall, A.D. (ed.) *Fluvial Sedimentology*. Can. Soc. Petrol. Geol. Mem. 5: 597-604.

Mosquera. A. y Ramos, V.A. 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. En Kay, S. y Ramos, V. (Eds.) *Evolution of an Andean margin: a tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat)*, Geological Society of America, Special Paper 407: 97-123.

Mosquera. A. 2008. Mecánica de deformación de la cuenca Neuquina. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (Inédita), 270 pp., Buenos Aires.

Mosquera, A., Silvestro, J., Ramos, V.A., Alarcón, M. y Zubiri, M. 2011. La estructura de la Dorsal de Huincul. En Leanza, *et al.* (eds.) Relatorio del 18° Congreso Geológico Argentino: 385-397, Neuquén.

Legarreta, L. y Gulisano, C.A. 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior - Terciario inferior). En Chebli, G. y Spalletti, L. (Eds.) Cuencas Sedimentarias Argentinas. X° Congreso Geológico Argentino. Serie Correlación Geológica 6: 221-243.

Oszczepalski, S. 1989. Kupferschiefer in southwestern Poland: Sedimentary environments, metal zoning, and ore controls. Geological Association of Canada Special Paper 36: 571-600.

Pángaro, F., Melli, A.T., Malone, P., Cevallos, M., Soraci, A., Mosquera, A. y Kim, H.J. 2005. Modelos de entrapamiento de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina. En Kozłowski *et al.* (eds.) Las Trampas de Hidrocarburos en las Cuencas Productivas de Argentina, Simposio del VI.º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 331-368.

Parry, W.T., Chan, M.A. and Nash, B.P. 2009. Diagenetic characteristics of the Jurassic Navajo Sandstone in the Covenant oil field, central Utah thrust belt. AAPG Bulletin 93 (8): 1039–1061.

Paz, M., Pons, M.J., Cávana, M.C. y Rainoldi, A.L. 2014. Distribución de facies en la Formación Portezuelo, su importancia en la circulación de fluidos (hidrocarburos-fluidos con Cu). XIX Congreso Geológico Argentino, Actas CD: T1-38, Córdoba.

Ploszkiewicz, J.V., Orchuela, I.A., Vaillard, J.C. y Viñes, R.F. 1984. Compresión y desplazamiento lateral en la zona de Falla Huincul: estructuras asociadas, provincia del Neuquén. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 163-169, Buenos Aires.

Pons, M. J., Franchini, M.B., Giusiano, A., Impiccini, A. y Godeas, M. 2009. Alteraciones, mineralización de Cu y bitumen en areniscas Cretácicas del Prospecto Barda González, Neuquén, Argentina. *Revista Geológica Argentina* 64 (3): 321-333.

Pons, M.J., Giusiano, A., Franchini, M., Impiccini, A., Ríos, J. F. y Testi, A. 2011. Diagénesis, alteración y mineralización de Cu en la Formación Huincul, Prospecto Tordillos, Cuenca Neuquina. 18° Congreso Geológico Argentino, Actas CD: S16, Neuquén.

Pons, M.J., Cesaretti, N. y Rainoldi, A.L. 2013a. Cambios texturales y de fluorescencia del cemento carbonático como indicadores de cambios fisicoquímicos durante la diagénesis de la Formación Portezuelo, Grupo Neuquén. 11° Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Actas: 249-254, San Juan.

Pons, M.J., Rainoldi, A., Franchini, M. y Giusiano, A. 2013b. Sediment- hosted copper deposits in the Cretaceous rocks of Neuquén basin, Argentina. *Proceedings of the 12th Biennial SGA Meeting, 12–15 August 2013: 667-670, Uppsala.*

Pons, M.J., Franchini, M., Giusiano, A., Maydagán, L. y Rainoldi, A.L. 2014. Mineralización de Cu (V-U) en la Formación Huincul, Prospecto Tordillos, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (4): 537-552.

Pons, M.J., Rainoldi, A. L., Franchini, M., Giusiano, A., Cesaretti, N., Beaufort, D., Patrier, P. and Impiccini, A. 2015. Mineralogical signature of hydrocarbon circulation in Cretaceous red beds of the Barda González area, Neuquén Basin, Argentina. *AAPG Bulletin* 99 (3): 525–554.

Rainoldi, A.L. 2015. Alteración regional de las sedimentitas cretácicas en la Dorsal de Huincul y en el Dorso de los Chihuidos. Su relación con la mineralización de Cu y con los hidrocarburos, Neuquén. Universidad Nacional del Sur, Tesis Doctoral. Inédita. 259 pp.

Rainoldi, A.L., Franchini, M.B., Cesaretti, N.N., Impiccini, A. y Pons, M.J. 2012. Alteración y decoloración de areniscas rojas, Formación Huincul (Grupo Neuquén).

Evidencias de la circulación de hidrocarburos en el Dorso de los Chihuidos. XIII Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 183-184.

Rainoldi, A., Franchini, M., Beaufort, D., Patrier, P., Giusiano, A., Impiccini, A. y Pons, M.J. 2014. Large-scale bleaching of red beds related to upward migration of hydrocarbons: Los Chihuidos High, Neuquén Basin, Argentina. *Journal of Sedimentary Research* 84: 373–393.

Ramos, V.A. 1975. Los ciclos sedimentarios y biorhexistacia en el control de las manifestaciones cupríferas del Neuquén extraandino, Argentina. 2° Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, Actas 5: 373-394.

Ramos, V.A. 1981. Descripción Geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte. Provincia del Neuquén. Servicio Geológico Nacional, Boletín 182: 1-103, Buenos Aires.

Ramos, V. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes* 22 (3): 183-19.

Reynoso, M. 1975. Tipología para las mineralizaciones de cobre asociadas a rocas sedimentarias. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 145-163, Buenos Aires.

Rodríguez, M.F., Leanza, H. A. y Salvarredy Aranguren, M. 2007. Hoja Geológica 3969-II, Neuquén, provincias del Neuquén, Río Negro y La Pampa. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 370, 165 pp., Buenos Aires.

Roedder, E. 1984. Fluid Inclusions. Mineralogical Society of America. *Reviews in Mineralogy* 12, 644 pp, Virginia.

Rose, A.W. 1976. The effect of cuprous chloride complexes in the origin of red-bed copper and related deposits. *Economic Geology* 71: 1036–1048.

Rose, A.W. 1989. Mobility of copper and other heavy metals in sedimentary environments: Geological Association of Canada Special Paper 36: 97–110.

Sánchez, M.L., Tarditi, J., Asurmendi, E. y Armas, M.P. 2008. El contacto entre los subgrupos Río Neuquén y Río Colorado (Cretácico Superior) en la zona del lago Los Barreales, Cuenca Neuquina, Neuquén. XVII° Congreso Geológico Argentino, Actas: 795-796.

Schumacher, D. 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. En Schumacher, D. y Abrams, M. A. (eds.) Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression, American Association of Petroleum Geologists Memoir 66: 71–89.

Sillitoe, R.H. 2005. Supergene oxidized and enriched porphyry copper and related deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume: 723-768.

Silvestro, J. y Zubiri, M. 2008. Convergencia oblicua: Modelo estructural alternativo para la Dorsal neuquina (39°S) Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (1): 49-64.

Surdam, R.C., Crossey, L.J., Hagen, E.S. and Heasler, H.P. 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. AAPG Bulletin 73: 1-32.

Surdam, R.C., Zun, S.J. and MacGowan, D.B. 1993. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants: A mechanism for significant porosity enhancement in sandstones. AAPG Bulletin 77: 1509-1518.

Thiry, M., Ayrault, M. B. and Grisoni, J.C. 1988. Groundwater silicification and leaching in sands: Example of the Fontainebleau Sand (Oligocene) in the Paris Basin. Geological Society of America Bulletin 100 (8): 1283–1290.

Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. and Ramos, V.A. 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.

Villar, H. J., Legarreta, L., Cruz, C. E., Laffitte, G. A. y Vergani, G. 2005. Los cinco sistemas petroleros coexistentes en el sector sudeste de la Cuenca Neuquina: definición

geoquímica y comparación a lo largo de una transecta de 150 km. VI° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos IAPG, Actas CD-ROM, Mar del Plata.

Walker, T.R. 1976. Diagenetic origin of continental red beds. In Falke, H. (Ed.) The Continental Permian in Central, West, and South Europe. Proceedings of the NATO Advance Study Institute: 353-368.

Wichmann, R. 1927. Sobre la Facies Lacustre Senoniana de los Estratos con Dinosaurios y su fauna. Boletín Academia Nacional de Ciencias 30: 383-405.

Woods, T.L. and Garrels, R.M. 1986. Use of oxidized copper minerals as environmental indicators. Applied Geochemistry 1: 181-187.

Zavala, C. y González, R. 2001. Estratigrafía del Grupo Cuyo (jurásico inferior-medio) en la sierra de la Vaca Muerta, Cuenca Neuquina. Boletín de Informaciones Petroleras 65, 3ra. época: 40-54.

## **EPIGRAFES DE LAS FIGURAS**

**Figura 1:** **a, b)** Mapa de ubicación del área de estudio y de las principales fallas inversas y cierres estructurales de los anticlinales de subsuelo. Modificado de Silvestro y Zubiri (2008). **c)** Sección estructural N-S (ubicación en fig. 1b) modificada de Silvestro y Zubiri (2008).

**Figura 2:** **a)** Mapa geológico-estructural del área de estudio, con la ubicación de Sierra Barrosa (SB), La Cuprosa (LC), Barda González (BG), y el Cerro Challacó (CC). **b)** Mapa geológico del prospecto La Cuprosa, con la ubicación del perfil estratigráfico (Fig. 4a) y de las trincheras de exploración. **c)** Sección estructural del área de estudio.

**Figura 3:** Mapas utilizados para el análisis de la alteración regional. **a)** Mapa geológico de la figura 2 superpuesto a combinación 321 de bandas Landsat 7. **b)** Clasificación supervisada (ver texto) con mapa geológico en línea punteada. **c)** Combinación de cocientes 3/1, 5/4, 5/7 de bandas Landsat 7, y **d)** misma combinación de cocientes con Análisis de Componentes Principales (PCA). Lineamiento NO-SE que delimita la decoloración en la Fm. Bajo de La Carpa (línea punteada blanca).

**Figura 4:** **a)** Perfil estratigráfico con las concentraciones estimadas de bitumen, calcita y cobre, y la ubicación de las fotografías de campo. **b)** Contacto entre las formaciones Cerro Lisandro y Portezuelo (línea punteada blanca) y límite de la decoloración en la Fm. Cerro Lisandro. **c)** Concreciones calcáreas impregnadas exteriormente por bitumen. **d)** Bitumen (Btm) delineando planos de estratificación en conglomerados cementados por calcita (Cal). **e)** Pirita (Py) alterada a hematita en niveles de areniscas. **f)** Nódulos de analcima en areniscas con óxidos de hierro. **g)** Impregnaciones de bitumen en las areniscas de las trincheras de La Cuprosa, en contacto con mineralización supergénica de Cu. **h)** Afloramiento de areniscas con abundantes óxidos de hierro.

**Figura 5:** Fotomicrografías con PP y XP de los cortes pulidos. **a)** Arenisca con clastos alterados a caolinita (kln) y cemento circungranular de arcillas (sme?). **b)** Clastos con impregnaciones de bitumen (btm) y sobrecrecimiento sintaxial de micro-cuarzo (mqtz). Detalle del micro-cuarzo (flechas blancas) en contacto con la calcita I (cal I). **c)** Fotomicrografías con luz reflejada de pirita (py) reemplazada por hematita (hem). **d)** Textura de clastos flotantes con cemento de calcita I y II (cal II), esta última asociada a impregnaciones de bitumen. Detalle del micro-cuarzo con bordes corroídos y engolfamientos

(flechas blancas) en contacto con calcita II. **e)** Mota de cemento de analcima (línea punteada) rodeada por clastos reemplazados por hematita.

**Figura 6:** Fotografías de campo. **a, b)** Trincheras de La Cuprosa donde se observan las zonas homogéneamente impregnadas en bitumen (Btm) en contacto con la mineralización de Cu. **c)** Tubos huecos tapizados por bitumen y detalle de un corte longitudinal. **d)** Fracturas irradiando desde las zonas impregnadas en bitumen. **e)** Conglomerado con la primera aparición de mineralización de Cu incipiente en el perfil. **f)** Motas de azurita (Azu) y mineralización supergénica de Cu en contacto con bitumen. **g)** Gradación desde facies blancas a facies rojas y anaranjadas hacia la periferia de la mineralización.

**Figura 7:** Fotomicrografía general (derecha) de las inclusiones fluidas y de detalle (izquierda), con luz refractada (PP). **a, b)** Inclusiones fluidas secundarias en clastos de cuarzo, de tipo IIa, IIb, y Ia. **c)** Inclusiones sólidas de pirita (Py) asociada a trenes de inclusiones de tipo Ia, con fotomicrografía de detalle en luz reflejada (derecha). **d)** Inclusiones fluidas primarias en cemento de calcita II (cal II), de tipo IIa y Ia.

**Figura 8:** **a)** Fotomicrografías con luz refractada y luz reflejada, que muestran calcopirita (ccp) anhedral, y crisocola (ccl) circungranular. **b)** Muestras de mano con motas de azurita (azu) y cemento de malaquita (mlc) en contacto con bitumen (btm). **c, d)** Fotomicrografías con luz reflejada (PP y XP) de venilla de malaquita cortando motas de azurita, y de crisocola circungranular relleno de la porosidad, respectivamente.

**Figura 9:** **a)** Block diagrama del área de estudio y modelo propuesto para la circulación de hidrocarburos (flechas negras) y de fluidos portadores de Cu (flechas verdes).

Sección estructural N-S modificada de Silvestro y Zubiri (2008). **b)** Perfil esquemático del área de La Cuprosa y migración de fluidos a través de los niveles de areniscas y conglomerados de la Fm. Portezuelo.

**Figura 10:** Secuencia paragenética.

**Cuadro 1:** Datos de porosidad intergranular de las distintas facies diagenéticas.

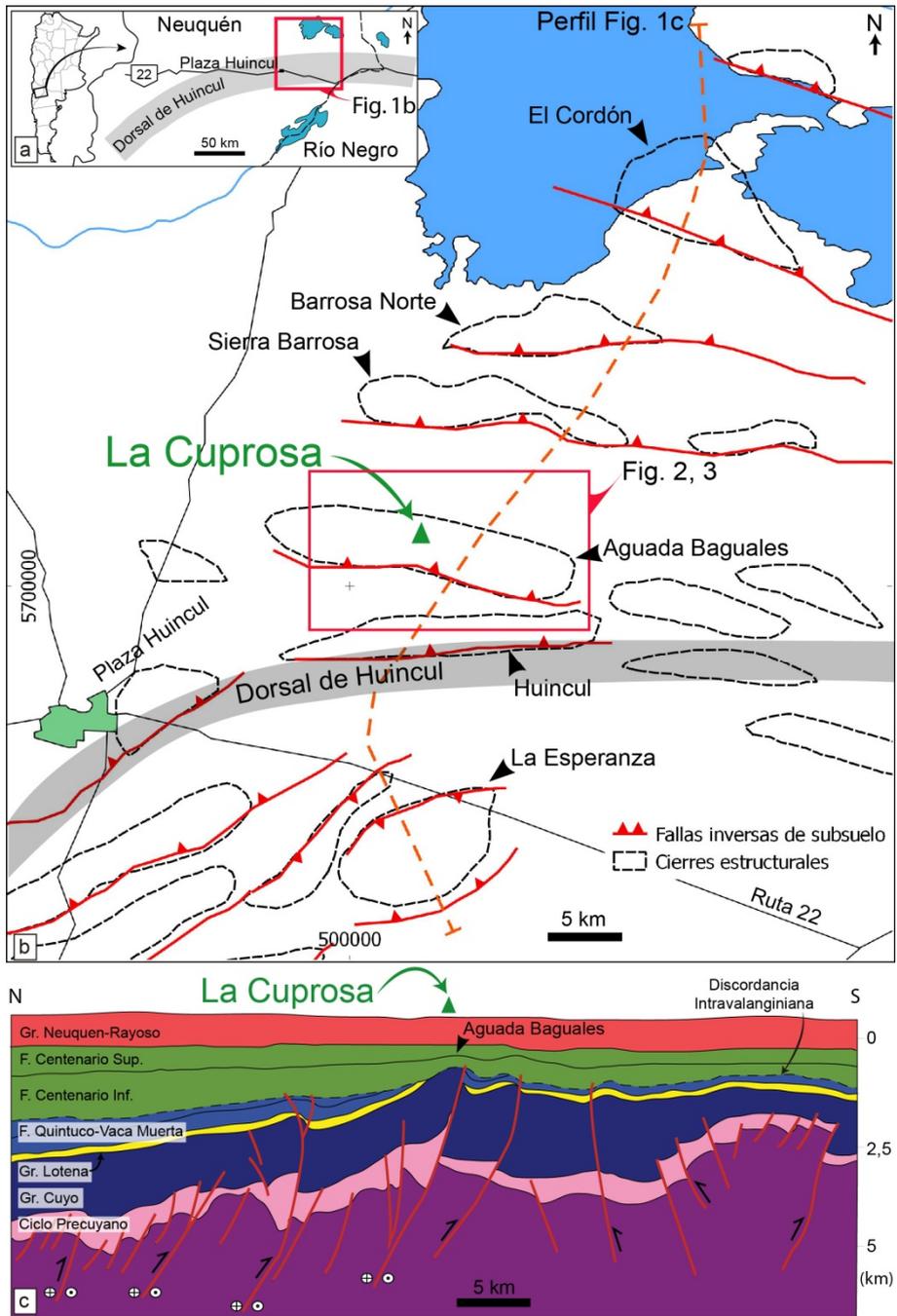


Figura 1

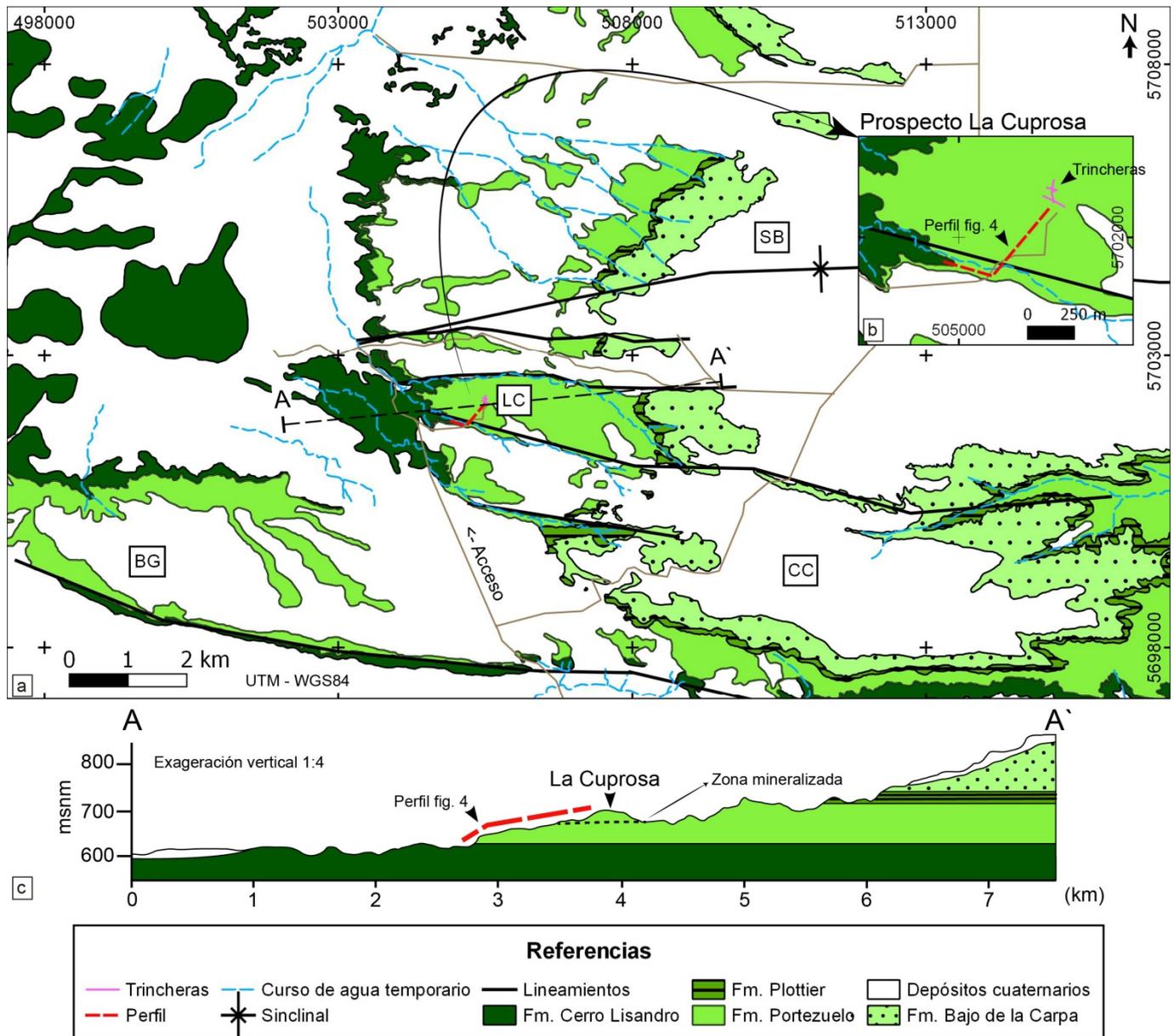


Figura 2

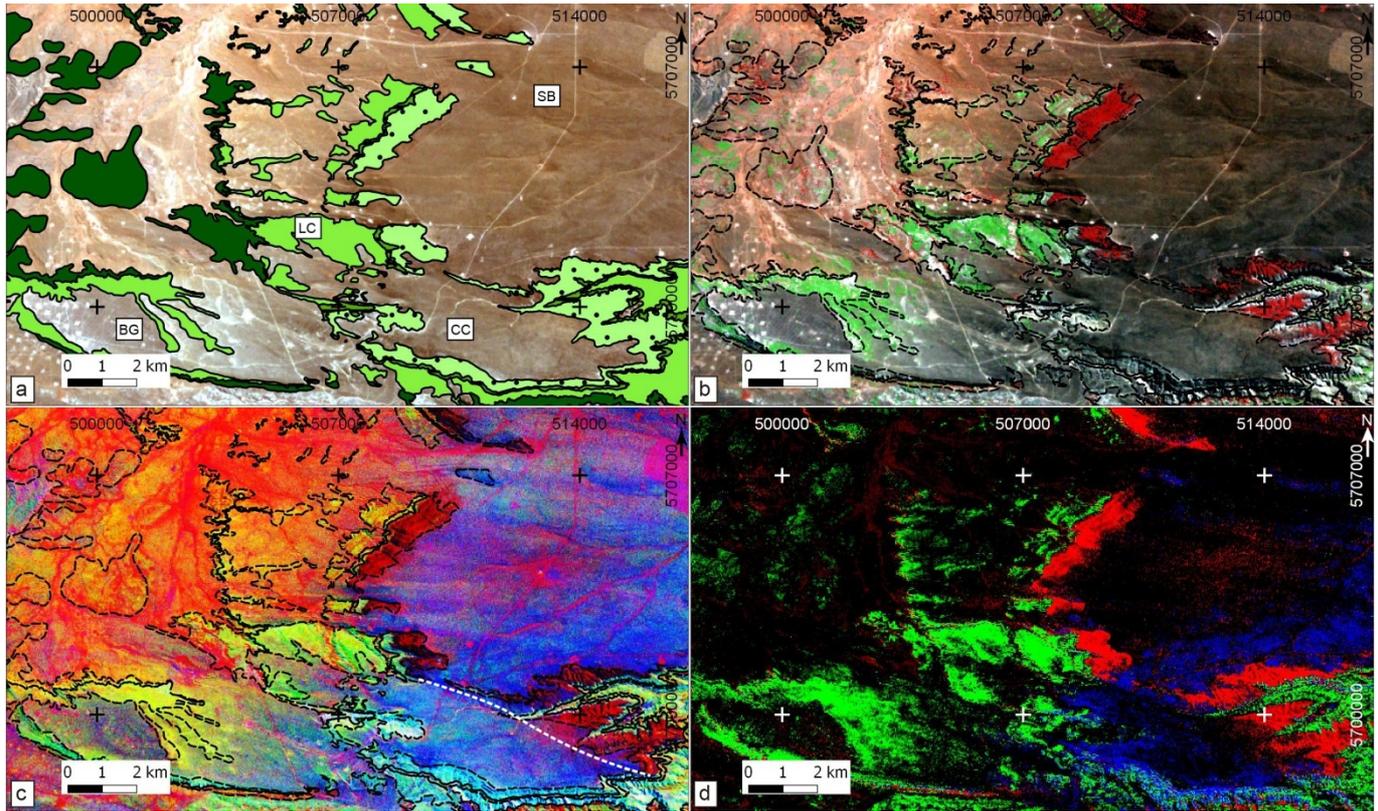


Figura 3

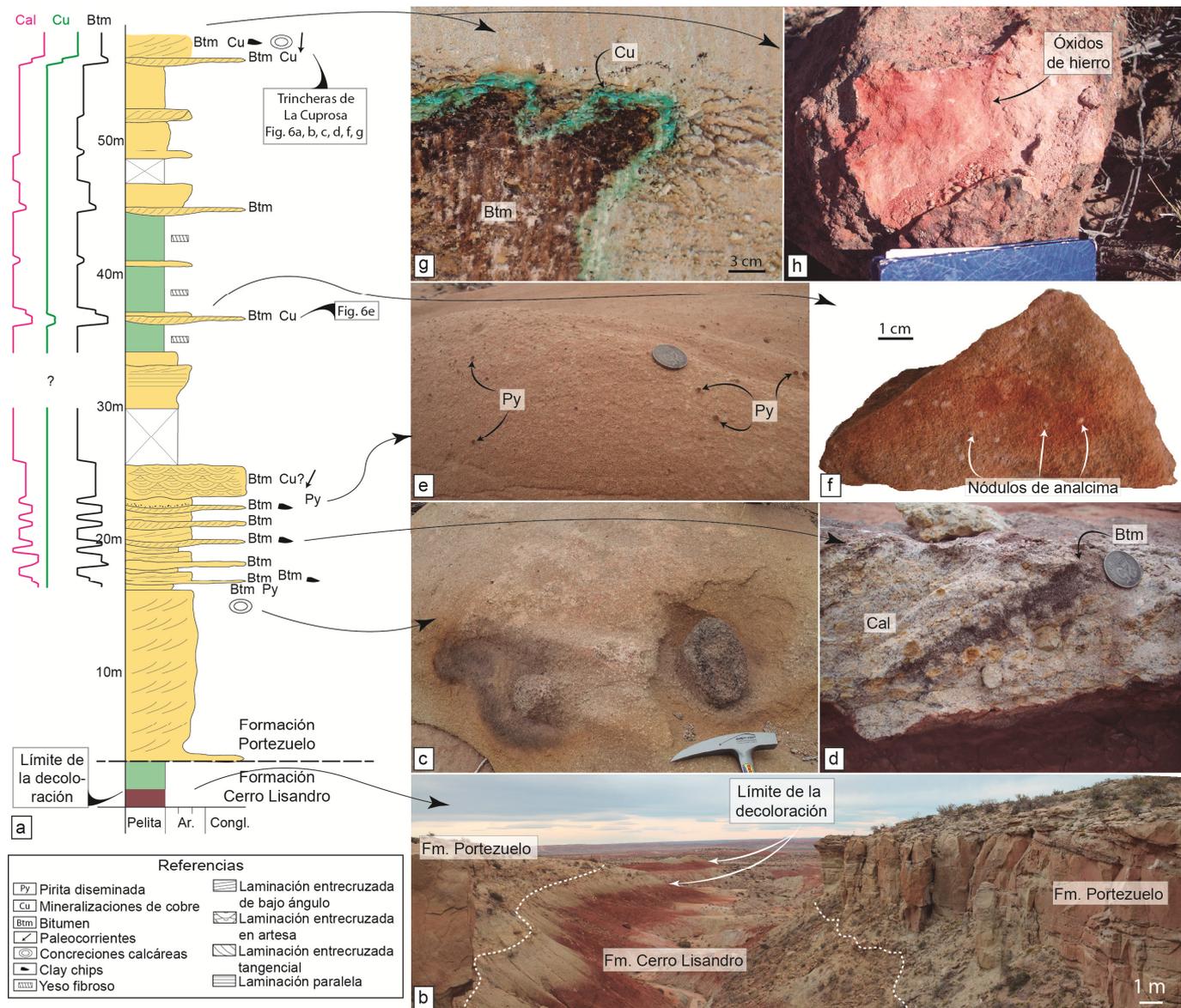


Figura 4

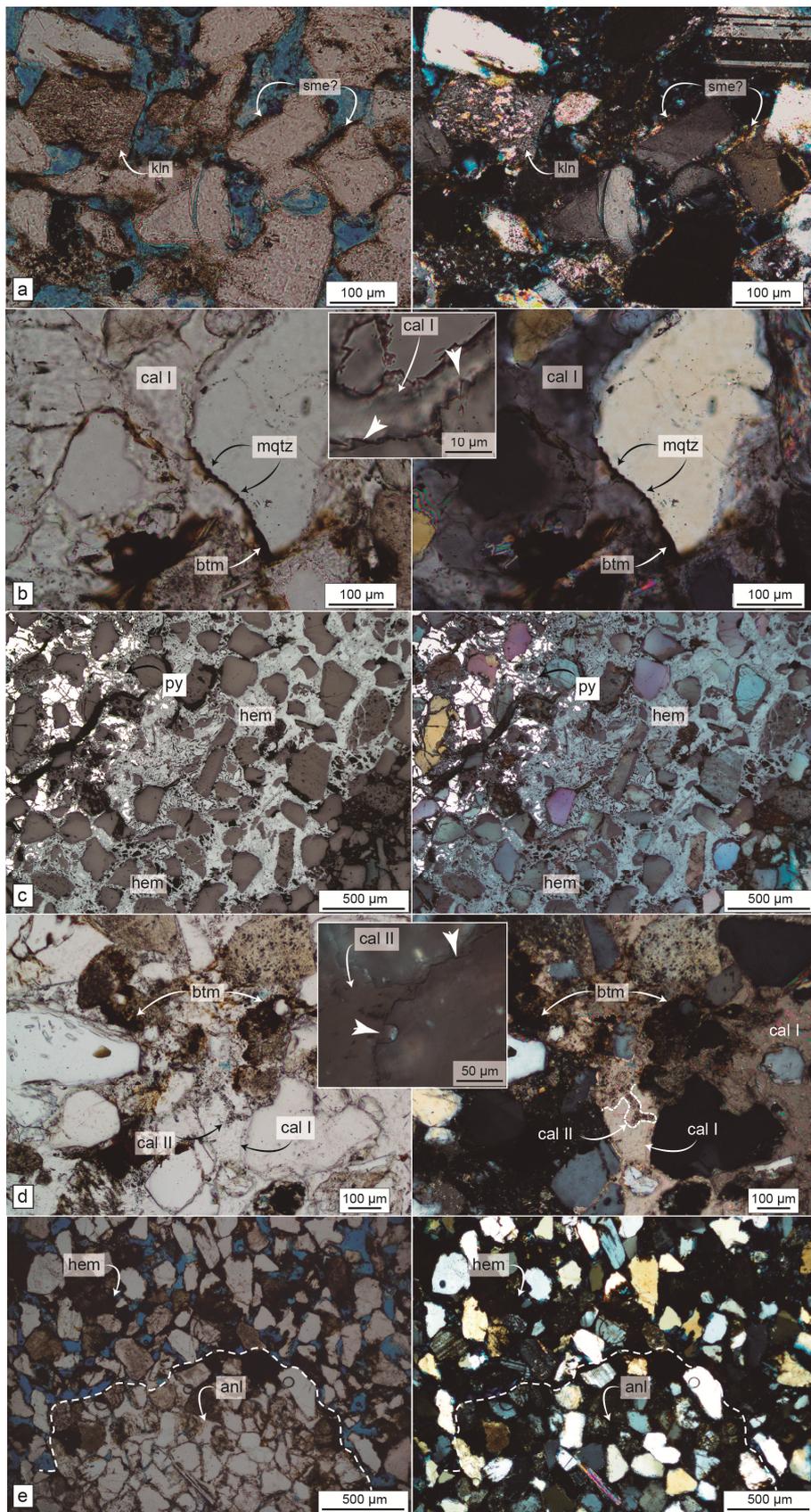


Figura 5

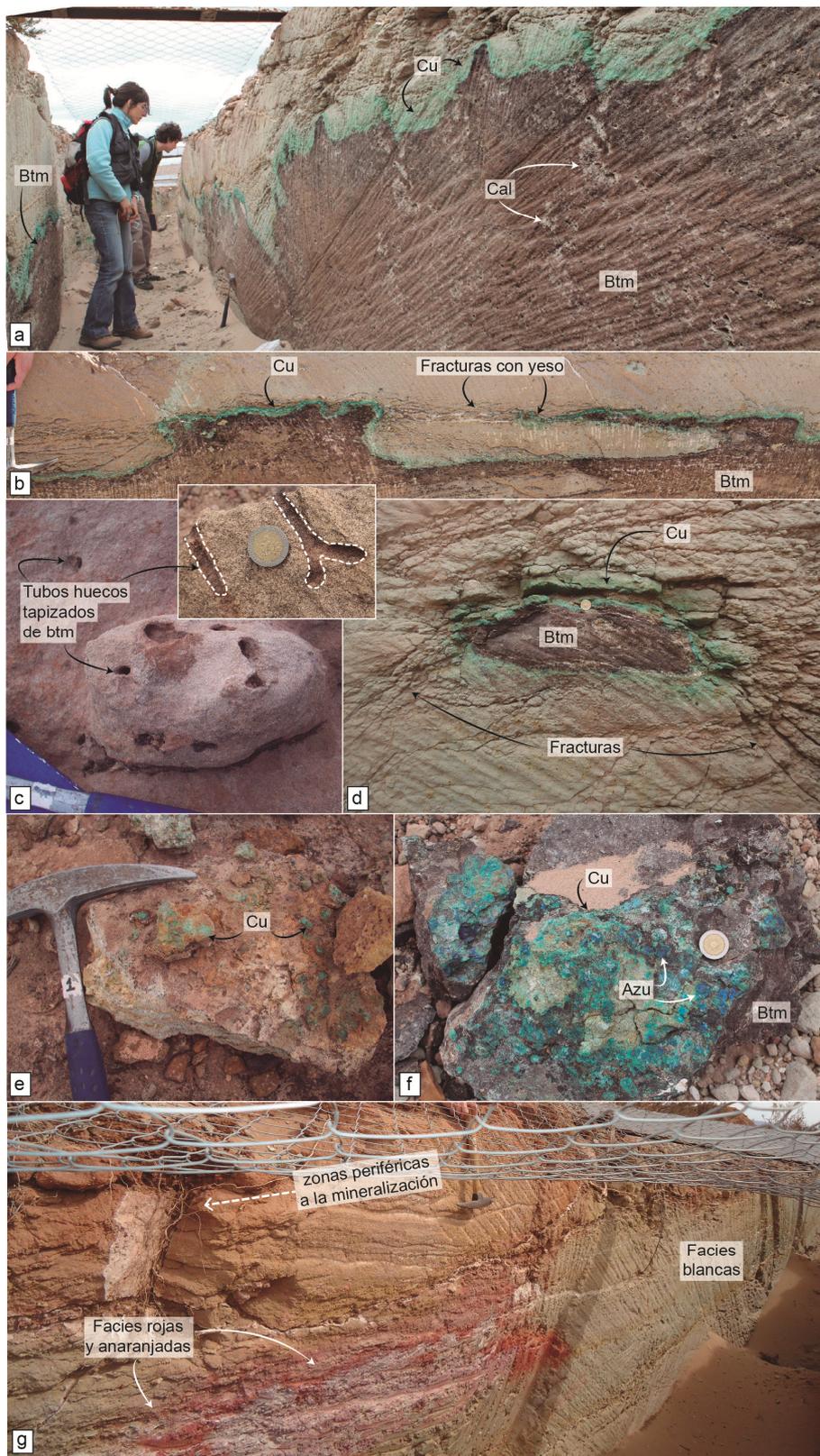


Figura 6

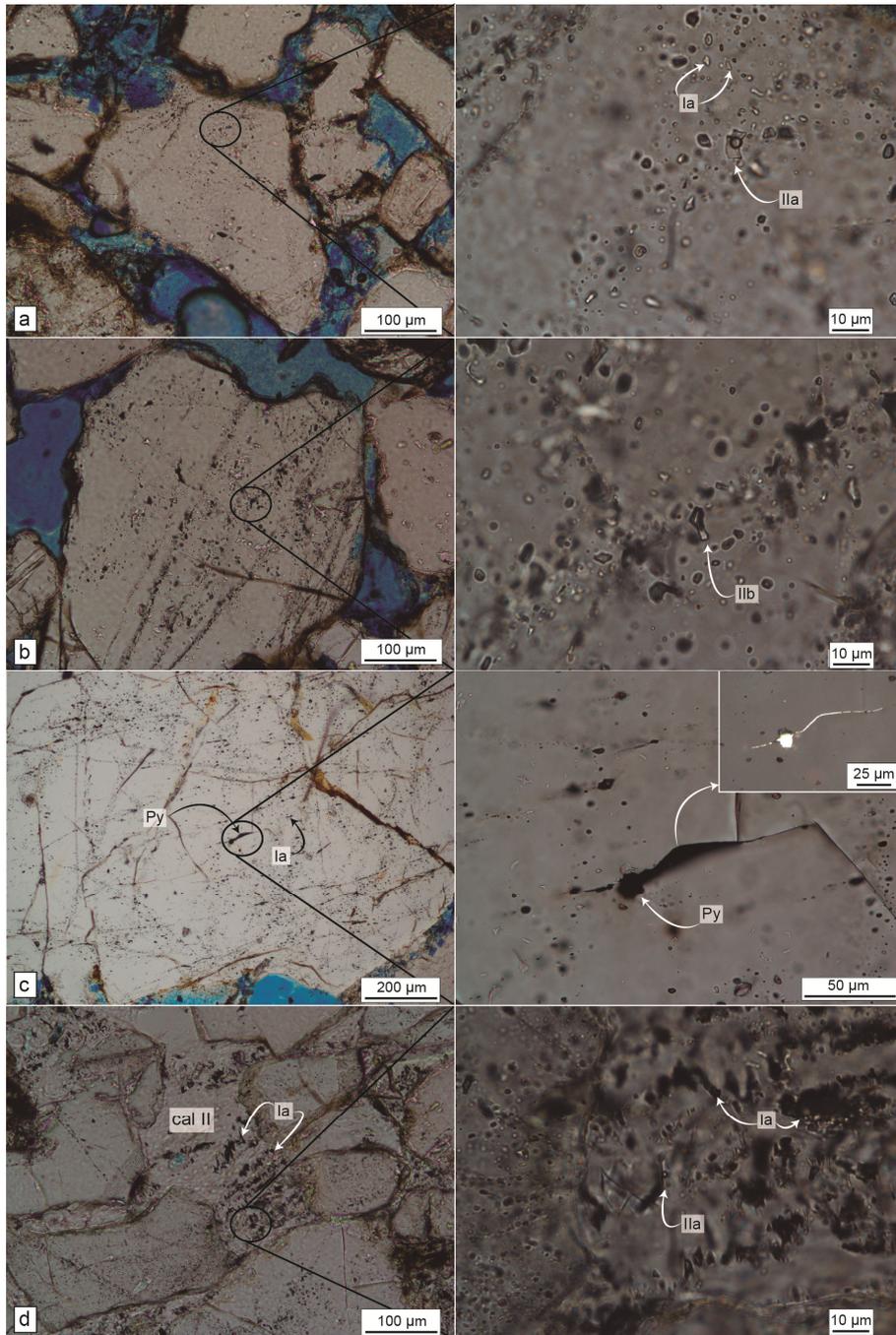


Figura 7

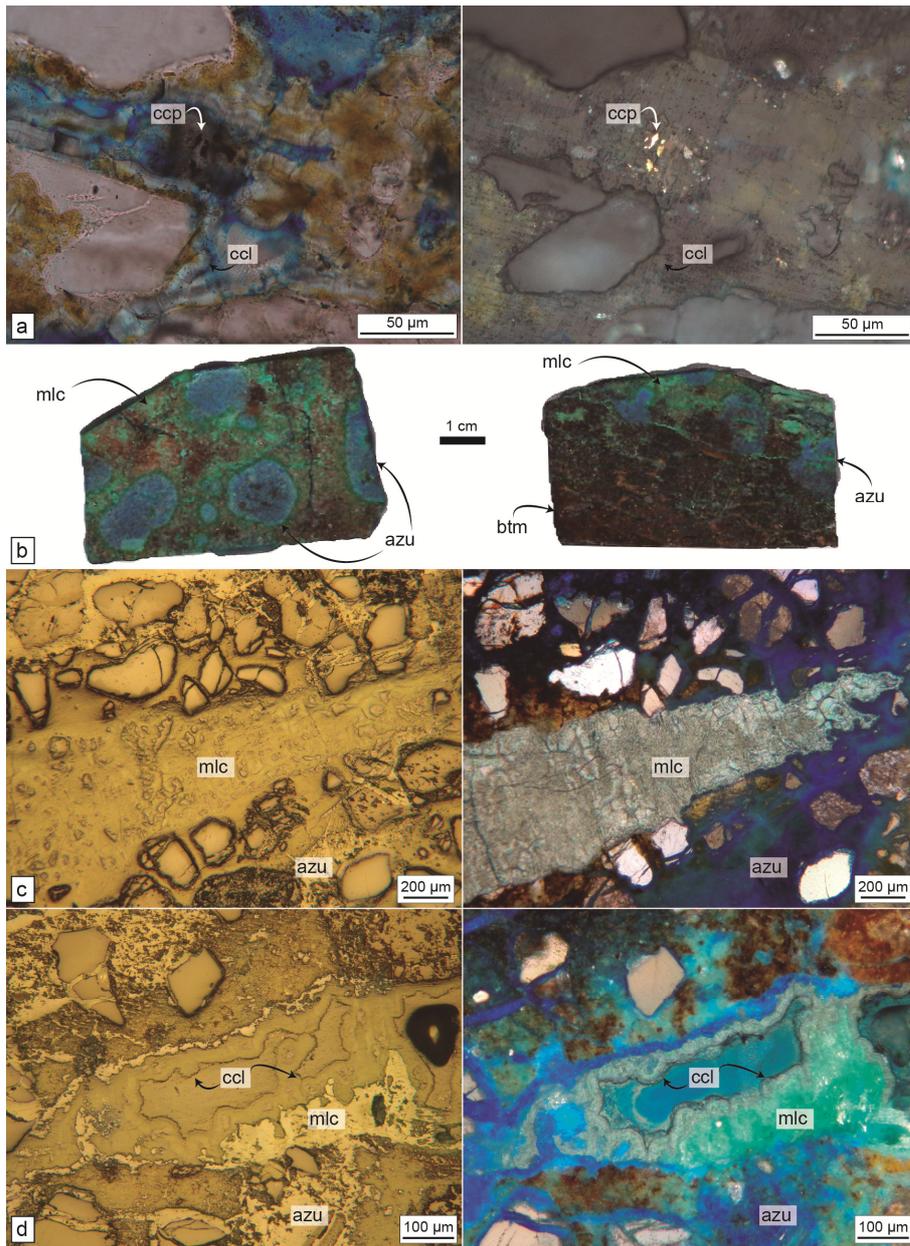


Figura 8

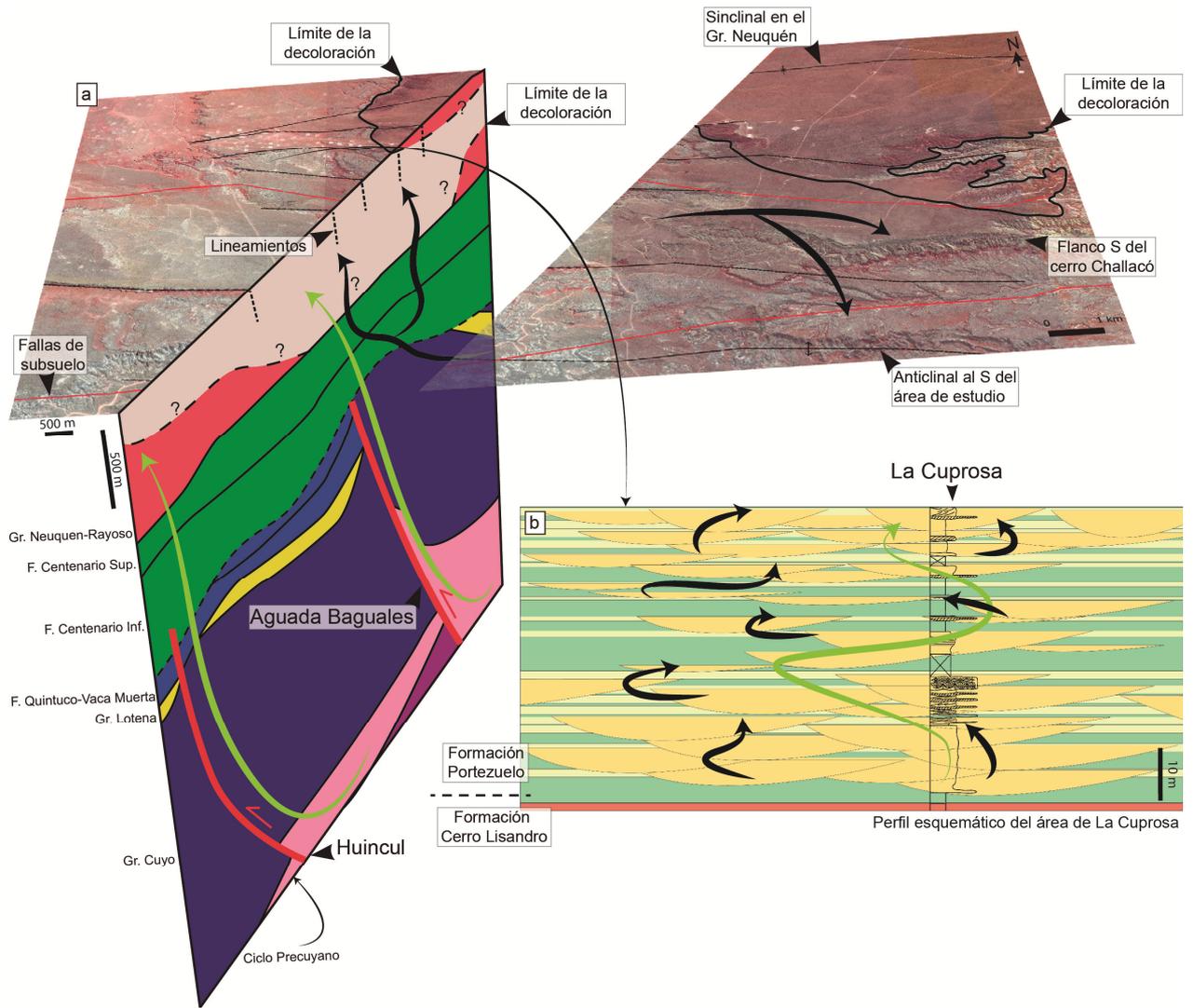


Figura 9

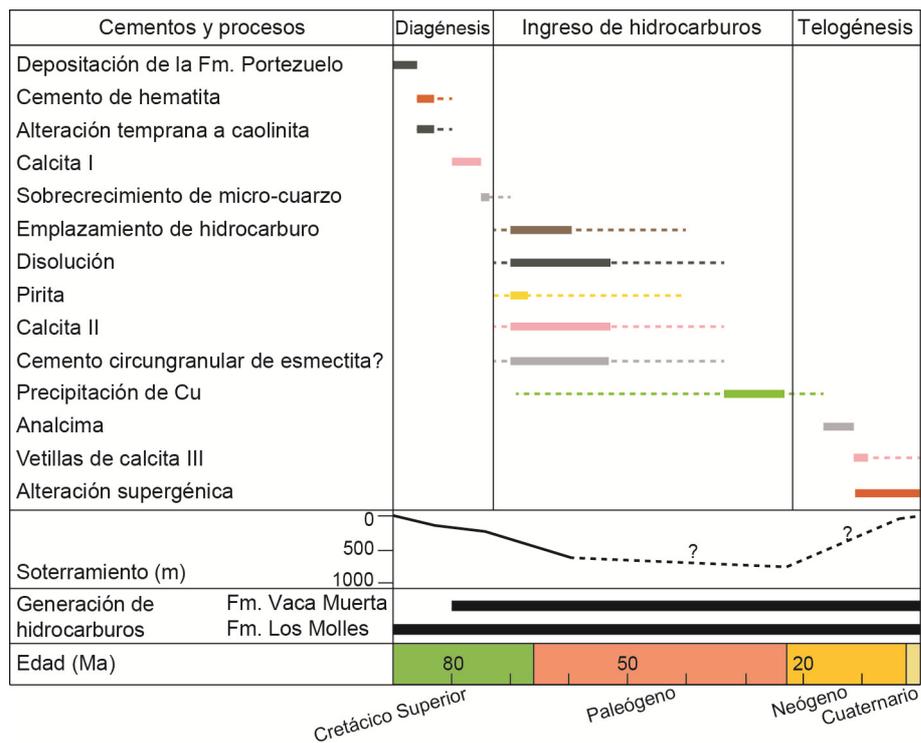


Figura 10

| Facies diagenéticas              | Muestra 1 | Muestra 2 | Promedio |
|----------------------------------|-----------|-----------|----------|
| Facies blancas                   | 17,08     | 17,67     | 17,375   |
| Facies grises                    | 5,89      | 3,6       | 4,745    |
| Facies negras                    | 5,36      | 1,05      | 3,205    |
| Facies rojas y anaranjadas       | 11,45     | 15,47     | 13,46    |
| Facies grises con mineralización | 4,94      | 0,07      | 2,505    |

Cuadro 1