

ARTÍCULO

ESTUDIO MINERALÓGICO DE MADERAS PETRIFICADAS DE LA FORMACIÓN CARAPACHA (PÉRMICO), LA PAMPA, ARGENTINA

Mineralogical study of petrified woods from the Carapacha Formation (Permian), La Pampa, Argentina

Baez, E. * ¹ , Crisafulli, A. ¹ , Kanbour, A. ²  & Zuliani, P. ³ 

RESUMEN: Este estudio tiene como objetivo investigar la mineralogía y los procesos diagenéticos involucrados en maderas fósiles de la Formación Carapacha. Las técnicas aplicadas con difracción de rayos X (DRX) y microscopía óptica de polarización permitieron el reconocimiento y caracterización de las fases presentes: cuarzo, calcita y óxidos de hierro. Las mineralizaciones identificadas siguen el patrón de las texturas orgánicas y con luz polarizada se distingue la morfología vegetal con tonalidades claras. También se tuvo en cuenta la relación entre los minerales presentes en las maderas silicificadas colectadas y la edad de la Formación, con la finalidad de reinterpretar el ambiente y considerar algunos aspectos ecológicos, climatológicos y biogeográficos de la vegetación que se desarrolló durante el Pérmico.

PALABRAS CLAVE: Formación Carapacha, maderas petrificadas, cuarzo, DRX, Pérmico.

1 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Centro de Ecología Aplicada del Litoral, CONICET-UNNE. Ruta 5 km 2,5. 3400 Corrientes.


2 Facultad de Ciencias Naturales, Escuela de Geología, Universidad Nacional de Salta/UNSa. Av. Bolivia 5150, A 4440 Salta.

3 Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CECOAL), Universidad Nacional del Nordeste. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Corrientes, Argentina.

* Autor de correspondencia: Enrique Baez. E-mail: filadelfia9108geologo@gmail.com

Como citar este artículo: Baez, E., Crisafulli, A., Kanbour, A. & Zuliani, P. (2024). Estudio mineralógico de maderas petrificadas de la Formación Carapacha (Pérmico), La Pampa, Argentina. Revista FACENA 34(1), 127-150. Doi: <https://doi.org/10.30972/fac.3417555>

Recibido/Received: 29/02/2024. Revisión: 01/03/2024. Aceptado/Accepted: 20/03/2024.

Editor asociado: Félix Ignacio Contreras 

Publicado en línea: 28/06/2024. ISSN 1851-507X en línea.

ABSTRACT: this study aims to investigate the mineralogy and diagenetic processes involved in fossil woods from the Carapacha Formation. The techniques applied by X-ray diffraction (XRD) and polarization optical microscopy allowed the recognition and characterization of the phases present: quartz, calcite and iron oxides. The mineralizations follow the pattern of organic textures and with polarized light the plant morphology is distinguished with light tones. The relationship between the minerals present in the collection of the silicified woods and the age of the Formation was considered in order to reinterpret the environment and consider some ecological, climatological and biogeographical aspects of the vegetation that developed during the Permian.

KEYWORDS: Carapacha Formation, petrified wood, quartz, DRX, Permian.

INTRODUCCIÓN

El interés de este trabajo es analizar la mineralogía de las maderas petrificadas provenientes de la Formación Carapacha que está determinada por el proceso de fosilización, influenciado por las condiciones del ambiente y de los fluidos mineralizantes (potencial redox “Eh”, Ph, T°, iones en solución, litología, permeabilidad, etc.). Además, las maderas petrificadas generalmente están silicificadas, lo que significa que el origen de petrificación de la madera involucra el intercambio de iones entre el tejido vegetal y la solución mineralizante rica en silicio, que generalmente reemplaza al tejido, conservando parte de la estructura vegetal (Hayase y Bengochea, 1976).

Antecedentes

Mitchell (1967), Mitchell y Tufts (1973) y Bustillo *et al.* (2000) estudiaron la mineralogía de maderas petrificadas de Charlottesville, Virginia (USA), de edad cretácica. A través de la difracción de rayos X (DRX) diferenciaron ópalo A (estructura desordenada y aproximadamente amorfa), ópalo C (estructura de cristobalita ordenada y algo de tridimita) y ópalo CT (estructura de cristobalita desordenada con tridimita). Taliaferro

(1935) aplicó la misma técnica en leños opalizados y halló estructuras de cristobalita de alta temperatura.

Lozano Fernández *et al.* (2011) determinaron que existe una gradación completa entre el ópalo original y el sílex final, por lo que, cuanto más antiguo es el ejemplar, mayor probabilidad hay de encontrar únicamente cuarzo (sílex). Es decir, que los minerales de las maderas fosilizadas experimentan una evolución desde una fase más amorfa o metaestable hacia una más estable y ordenada (Hayase y Bengochea, 1976).

En Argentina, los trabajos mineralógicos realizados en maderas petrificadas son escasos. Para la Formación Carapacha, sólo se cuenta con el estudio xilológico de Crisafulli *et al.* (2000); en el que se cita especies de los géneros *Schopfiicaulia* Mussa y *Araucarioxylon* Kraus (= *Agathoxylon*) permitiendo establecer una correlación con las paleoxilofloras pérmicas de la Antártida, Brasil e India, debido a que estos taxones ya fueron allí citados. Las muestras en estudio fueron recolectadas de dos localidades de La Pampa: un afloramiento en cercanías de Puelches y otro en el extremo SE de la sierra de Calencó, descritas por Melchor en 2000 (Figs. 1 y 2).

El análisis de la mineralogía presente en las maderas fósiles de esta unidad estratigráfica contribuye a aportar datos sobre el paleoambiente en el que se desarrolló la vegetación durante el Pérmico.

Localización Geográfica

Las maderas petrificadas aquí estudiadas provienen de dos localidades de la provincia de La Pampa, Argentina, donde aflora la Formación Carapacha (Fig. 1). Para acceder al área se tomó como base el área tipo de la unidad (*sensu* Melchor, 2000; Crisafulli *et al.*, 2000), sobre el río Curacó, a 12 km al SE de Puelches. En una de esas localidades aflora el Miembro Urre- Lauquen a 38°11'13"S, 65°55'18"O (A en Fig. 2) y en la otra al extremo SE de la Sierra de Calencó en la estancia San Roberto el Miembro Calencó a 38°13'16"S, 65°48'50"O (B en Fig. 3).

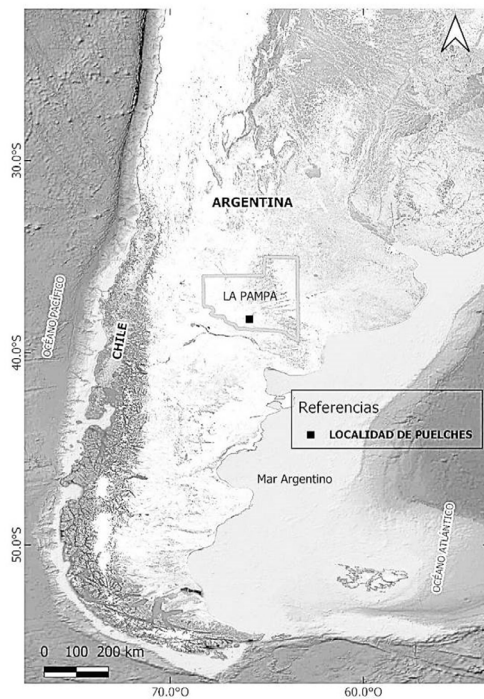


Fig. 1. Mapa de ubicación de la localidad de Puelches de donde proceden las maderas fósiles estudiadas.

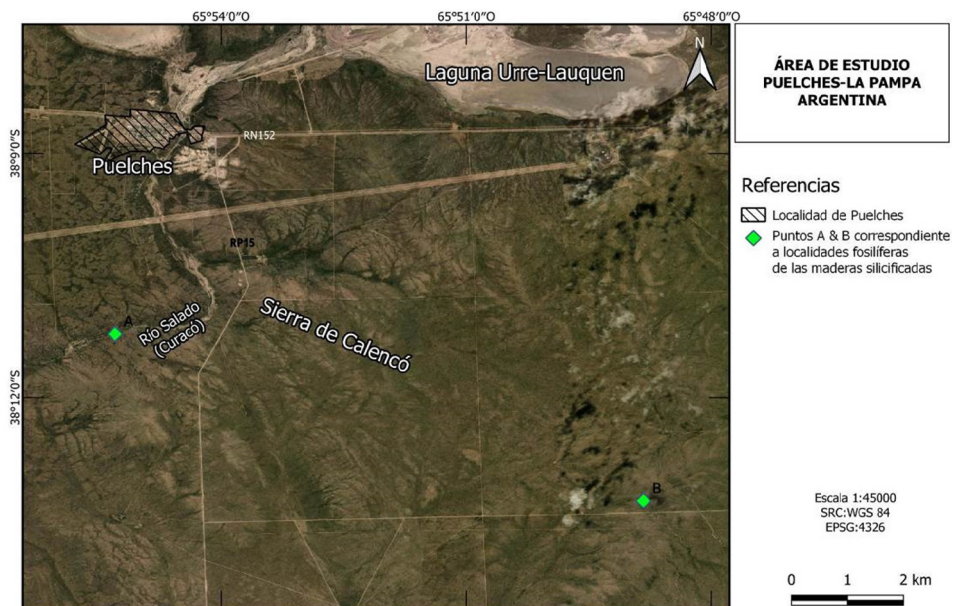


Fig. 2. Localidades fosilíferas correspondientes a las maderas silicificadas A (cerca del pueblo de Puelches) y B (área de la estancia San Roberto, extremo SE de la sierra Calencó) de la Formación Carapacha, La Pampa.

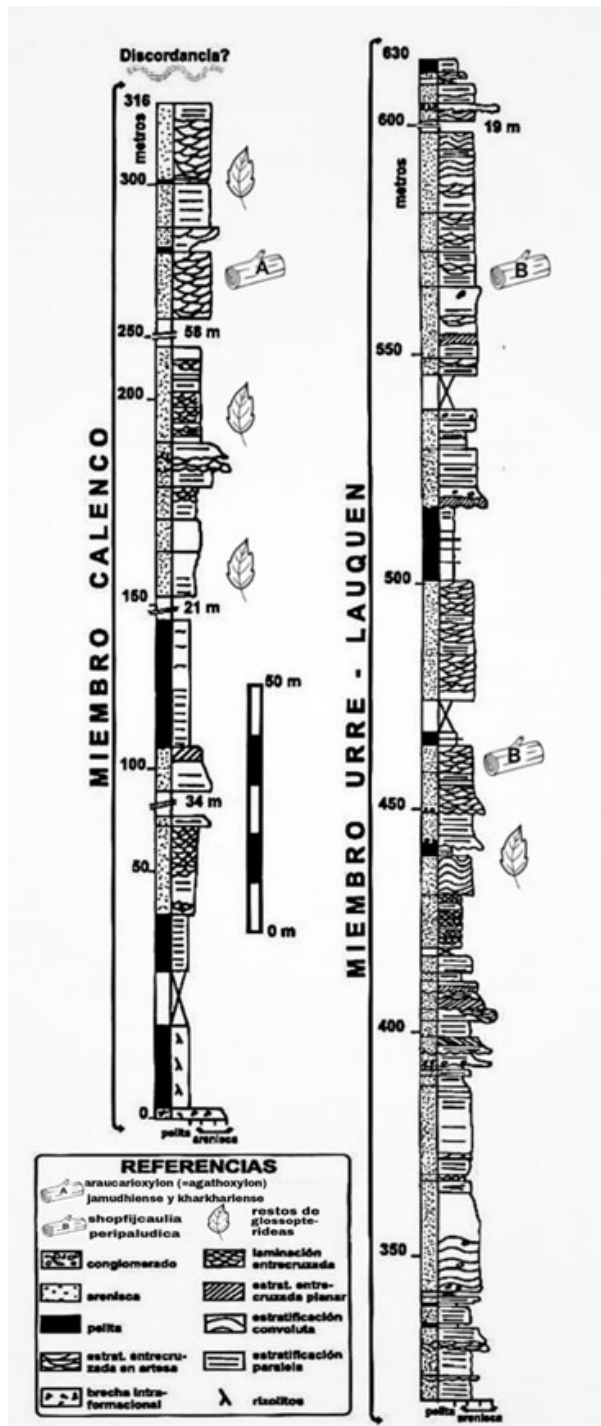


Fig. 3. Perfil litológico y ubicación estratigráfica de los taxones: *Araucarioxylon* (= *Agathoxylon*) *jamudhiense* y *A. kharkhariense* en el Miembro Calencó (A) y *Schopfjaulia peripaludica* Mussa en el Miembro Urre-Lauquen (B). (Tomado y modificado de Melchor 1999).

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca de Carapacha de edad pérmica es una depresión alargada en la corteza terrestre, formada por una extensión tectónica y rellenada por sedimentos de naturaleza continental. Constituye una cuenca de rift en sentido NO-SE, de un área aproximada de 4800 km², ubicada al sur de la provincia de La Pampa, Argentina.

La deformación pérmica de la cuenca de Carapacha involucra procesos de remagnetizaciones en las direcciones de oeste a este que se fueron atenuando hacia finales del Pérmico registrados en gran parte de Argentina y Sudamérica (Tomezzoli, 2012). Estos procesos se traducen como resultado de la migración de fluidos expulsados del área orogénica que afectaron rocas no involucradas directamente en la deformación. Los sedimentos de la Formación Carapacha que están suavemente plegados en la localidad de Río Curacó (remagnetizaciones sintectónicas: magnetizaciones características de polaridad reversa), indican que la magnetización de la roca y de los sedimentos de la cuenca se reorientan o se modifican mientras los materiales líticos están siendo deformados tectónicamente; es importante mencionar la remagnetización sintectónica en este trabajo, debido a la orientación de la fábrica diagenética de los componentes de los leños petrificados observadas en las láminas delgadas (Fig. 7). Esto puede interpretarse como indicador de la compleja historia geológica del área de Curacó, sumado a la actividad magmática y tectónica sobre la posición geográfica de las placas tectónicas antiguas en la región de Gondwana. En la estancia San Roberto, los sedimentos son casi horizontales (remagnetizaciones postectónicas: magnetizaciones características de polaridad normal y reversa) yacen en discordancia regional sobre la Formación La Horqueta de edad más antigua. Las remagnetizaciones postectónicas son eventos de remagnetización que ocurren después de la deformación tectónica principal. En esta contribución, las observaciones de las láminas delgadas (Fig. 6) aportan evidencia de los algunos de los procesos geológicos que siguieron a la orogenia de San Rafael y son indicadores de la paleogeografía respecto a la evolución de la cuenca sedimentaria del área del miembro Calencó antes de la inversión

tectónica de la región (Chernicoff *et al.* 2008) (Figs. 4 y Cuadro 1).

La cuenca de Carapacha tiene un espesor de aproximadamente 630 m, rellena por rocas clásticas con sedimentos de facies fluviales transitorias y lacustres (relacionados con fluctuaciones en la profundidad de los lagos a lo largo del tiempo geológico). El basamento de rocas metamórficas del Cámbrico Tardío al Devónico Temprano (Complejo metamórfico Las Piedras), es la base rocosa sobre la cual suprayacen los estratos sedimentarios fluvio-lacustres y no es aflorante en la cuenca. Su estructura, componentes y características de semigraben son esenciales para comprender la geología y la historia de la región de Puelches y San Roberto.

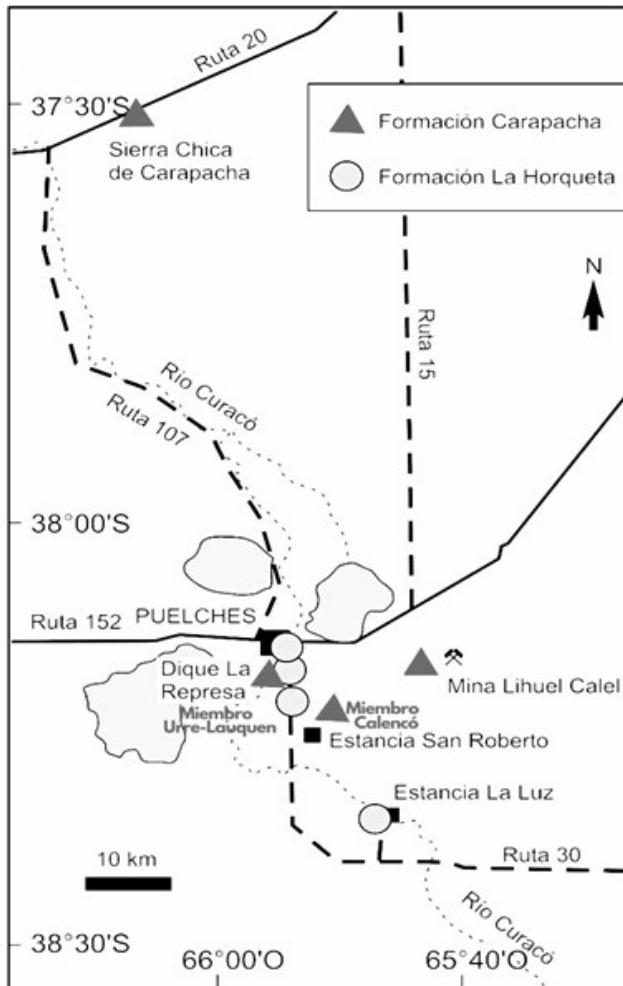
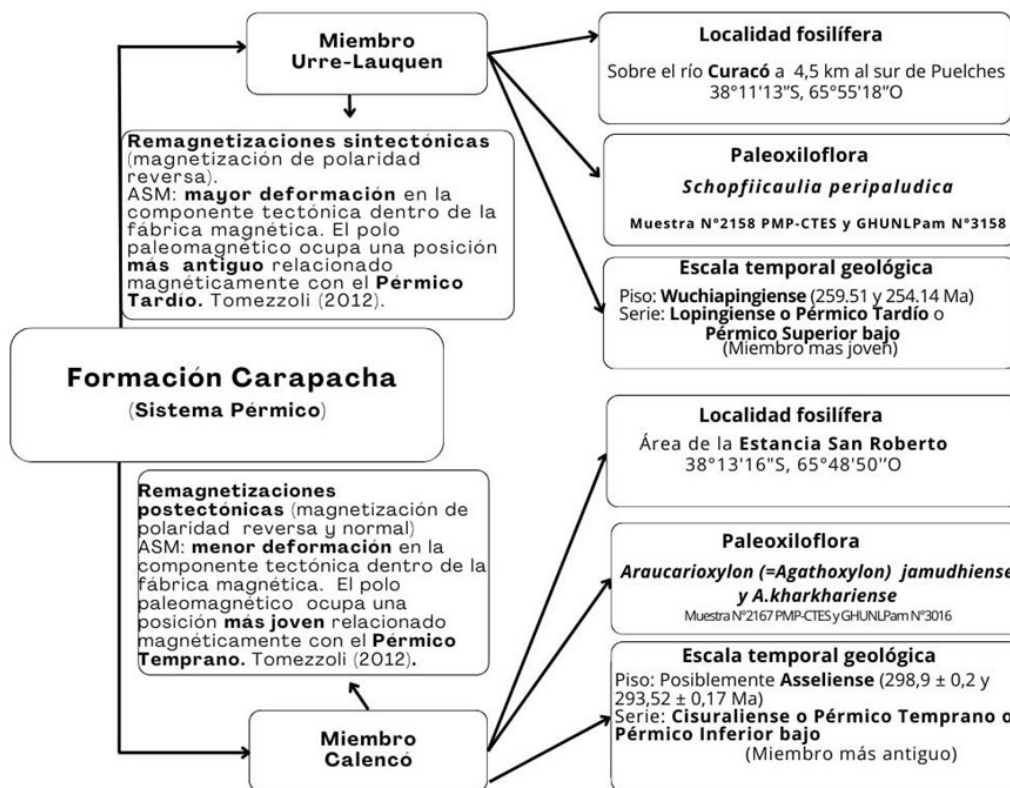


Fig. 4. Mapa de ubicación de los afloramientos según Chernicoff *et al.* (2008). Área de la localidad de Puelches y estancia San Roberto. (Tomado y modificado de Tomezzoli 2012).

Cuadro 1. Cuadro comparativo de los Miembros Urre-Lauquen y Calencó de la Formación Carapacha.



Evidencia paleomagnética de la cuenca Carapacha: los resultados paleomagnéticos disponibles para Patagonia fueron interpretados por Chernicoff *et al.* 2008 y Tomezzoli (2009) como remagnetizaciones pérmicas, consistentes con las paleolatitudes planteadas para Sudamérica. Esto, según Tomezzoli (2009), indica que durante el Pérmico ambos bloques, Gondwana y Patagonia, estaban unidos y no presentaron desplazamientos latitudinales relevantes. Estos autores han hallado tres posiciones paleopolares: la primera posición corresponde al Pérmico Temprano donde las magnetizaciones y/o remagnetizaciones son claramente sintectónicas (Tunas I, Curacó, Cochicó, Sierra Chica, Hoyada Verde, Alcaparrosa y Ponón Trehue), la segunda concierne al Pérmico Tardío Temprano, donde las magnetizaciones y/o remagnetizaciones están menos afectadas por la deformación (Tunas II, San Roberto e Independencia en Paraguay), y la última involucra al Triásico. Estas tres posiciones

paleopolares mencionadas ponen en evidencia que hubo movimientos latitudinales en el remanente de asociaciones paleomagnéticas, que se encuentran solapadas en sus fábricas magnéticas en edades geológicas distintas que varían respecto a la edad cronológica de la cuenca de Carapacha y su edad de magnetización (Fig. 4).

Los estudios paleomagnéticos llevados a cabo por Tomezzoli (2009) en rocas pérmicas a lo largo de todo el margen sudoccidental del Gondwana expusieron la existencia de dos deformaciones superpuestas en el área de la localidad de Puelches, similar al área de las Sierras Australes y un hiato entre el Ordovícico Tardío - Devónico de la Formación La Horqueta y el Carbonífero-Pérmico lo cual ponen de manifiesto que esta región presentan un grado de deformación mayor con diferencias litológicas y estructurales en la Formación La Horqueta que las rocas pérmicas suprayacentes de la Formación Carapacha (Tickyj *et al.* 1997) (Fig. 4).

Las diferentes posiciones paleomagnéticas calculadas por Tomezzoli *et al.* (2006) para ambos miembros de la Formación Carapacha con sus diferencias litológicas, estructurales, bioestratigráficas y de patrones de fábricas magnéticas, fueron vinculadas a la fase orogénica San Rafael. Estas diferencias son causa de que los afloramientos sobre el río Curacó ocupan en el polo paleomagnético una posición más antigua en el Pérmico Tardío que aquellos de la estancia San Roberto, que ocupan una posición más joven en el Pérmico Temprano, coincidentes con las diferencias geológicas encontradas por Melchor (1995). Los estudios de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) realizados en estas rocas pérmicas, revelan que la componente tectónica dentro de la fábrica de anisotropía es distinta para ambos miembros. Así, el Miembro Urre-Lauquen "Curacó" presenta mayor deformación que el Miembro Calencó "San Roberto". Las posiciones paleomagnéticas sugieren que, aunque San Roberto es cronológicamente más antiguo, su edad de magnetización puede ser más joven que las del Río Curacó, consistente con las diferencias en la fábrica magnética. Las interpretaciones propuestas por Tomezzoli *et al.* (2006) indican que la actividad orogénica ha afectado más fuertemente el área superior "Curacó", donde la deformación de la corteza terrestre se evidencia en la megaestructura de la cuenca (Fig. 2), como también a nivel de afloramientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales: las muestras analizadas pertenecen a la Colección de Geología Histórica de la Universidad Nacional de La Pampa bajo el acrónimo GHUNLPam N°3016, (fragmentos II-III) y GHUNLPam N°3158 (fragmentos IV-V) y los preparados micropaleontológicos CTES-PMP N°2167 y CTES-PMP N°2158 a la Colección Paleontológica Dr. Rafael Herbst de la Universidad Nacional del Nordeste, que se encuentran depositadas en el Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CECOAL-CONICET-UNNE), Corrientes.

Para el estudio petrográfico se confeccionaron secciones delgadas de 0,03 mm de espesor a partir de cada fragmento lítico de la madera fósil impregnado en resina epoxi, cortado, pulido y montado en un portaobjeto y protegido con cubreobjetos. El estudio consistió en observar bajo el microscopio de polarización (luz normal y polarizada) las distintas texturas, estructuras y composición mineralógica, lo que permitió la caracterización mineralógica de cada muestra.

Esta metodología puede aportar información acerca de la silicificación del polimorfo de sílice.

Según determinaciones del Dr. Maiza (Com. pers.): cuando el cuarzo está bien cristalizado y ya estabilizó su estructura, tiene características ópticas definidas entre las que se destacan: el sistema cristalino (hexagonal), extinción recta, índices de refracciones medibles y características, color de interferencia y figura de interferencia uniaxial positiva, entre otras. Todas las demás polimorfos de sílice son inestables y con el tiempo (geológico) llegarán a su forma estable (cuarzo α).

La calcedonia tiene propiedades variables que son consecuencia de la evolución del polimorfo de sílice. Su hábito es microcristalino y según el corte puede dar textura fibrosa o granular. El índice de refracción es menor que el del cuarzo, la extinción puede ser positiva o negativa y hay polimorfos de extinción oblicua; dependerá de las condiciones de su formación y que haya alcanzado el equilibrio fisicoquímico para poder determinarla, casi siempre hay una mezcla de estructuras no conformadas (Hayase y Bengochea, 1976).

El ópalo (con sus variables) es isótropo, con índice de refracción mucho más bajo que el cuarzo y que la "calcedonia". Microscópicamente no aporta

mucho para su determinación y presenta una estructura metaestable. El índice de refracción del ópalo es muy bajo ($\pm 1,46$) y principalmente la cantidad de agua que contiene varía entre muy poco y 10%. En síntesis, cuarzo y calcedonia puede diferenciarse por su anisotropía y textura fibrosa, mientras que el ópalo es isótropo (Lozano Fernández *et al.*, 2011).

Observaciones macroscópicas: se utilizó lupa Leica S9i que tiene 0,6-5,5 de aumento y los oculares 10x.

Observaciones microscópicas: las secciones delgadas de las muestras corresponden a cortes longitudinales, transversales y tangenciales que fueron observadas al microscopio de polarización Leica DM 750P, con cámara acoplada Leica DMC 2900 (cámara de video de alta resolución y programas computarizados para tratamiento de imágenes y cuantificaciones), utilizando los objetivos de: 4X, 10X, 20X, 40X y oculares de 10X.

La metodología de trabajo por difracción de rayos X (DRX) fue la siguiente: se utilizó un difractómetro Rigaku (D-3 MAX) controlado por un ordenador, provisto de un anticátodo de Cu, monocromador de grafito, con una potencia de 35 Kv y una corriente de 15 mA, a una velocidad de exploración de $0,02^\circ$ y un tiempo de conteo de 1 s/paso.

Las muestras estudiadas (GHUNLPam N°3016: fragmento II) fueron molidas en un mortero de ágata e irradiadas utilizando portamuestra de vidrio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción macroscópica de las muestras de San Roberto y Puelches: a simple vista y con el apoyo de un estereomicroscopio Leica S9i se observó que las muestras presentan color pardo claro a oscuro, con sectores blancos y zonas pardas oscuras a rojizas donde es común encontrar óxidos de hierro, como se distingue en la Figura 5 a. Las muestras son compactas interna y externamente como se observan en las Figuras 5 b y c. En el corte transversal estudiado se distingue una marcada zonación en la tonalidad del material que sigue el patrón de la estructura vegetal debido a la sustitución del tejido por sustancias inorgánicas, como se observa en la Figura 5 d.

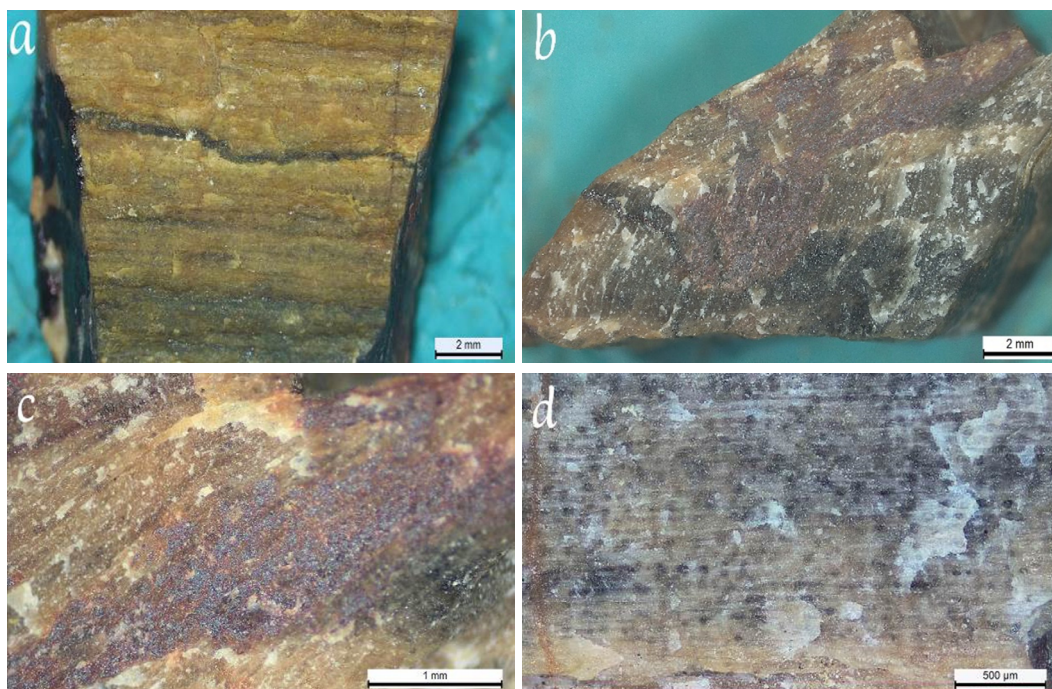


Fig. 5 *a)* Zonación de tonos y coloraciones pardas y marrones claro a oscuros en la superficie de la muestra. *b)* Sector interno de la madera de aspecto compacto (fragmentos II-III). *c)* Superficie externa compacta. *d)* Corte transversal de la madera conservando la textura vegetal (fragmentos IV-V).

Maderas silicificadas del área de San Roberto

Descripción microscópica: en la Figura 6 a y b se observan cristales de cuarzo con textura granular de tamaño grueso a medio y estructuras en bandas de grano fino microcristalino a criptocristalino de cuarzo que adoptan orientaciones preferentes (fábricas con estructuras bandeadas). Ambas texturas siguen el mismo patrón de estructuras paralelas e irregulares no equidimensionales, concéntricas en el núcleo de la traqueida; muestran un desarrollo morfológico a partir del centro de la traqueida (Fig. 6.a); y reemplazamiento total de la textura vegetal por sílex con inclusiones de minerales oscuros (Fig. 6.b.).

Comentarios

Todas las muestras del área de San Roberto de la cuenca Carapacha son totalmente cuarzo, es decir tienen color de interferencia gris de primer orden y son uniáxicos positivos, el índice de refracción mayor a 1,54 (mayor que el índice de refracción del bálsamo de Canadá). Inclusive en los granos más pequeños se observan claramente las propiedades ópticas del cuarzo. No se determinó ópalo, sílice fibrosa, ni otros polimorfos de sílice.

Interpretación

En las maderas petrificadas del área de San Roberto, se observó el dominio de los cristales de cuarzo con formas irregulares.

Las zonas de granos finos a criptocristalinos son indicadoras de cambios bruscos en los fluidos, mientras que las de granos medio a gruesos y mal delimitadas se interpretan como cambios progresivos (Demoustier *et al.*, 1998). Esto sería consecuencia de la presencia de soluciones muy concentradas, asociadas a cambios de presión y caída de temperatura y de la estructura vegetal que están reemplazando (Dr. Maiza, Com. pers). En ese caso la orientación preferencial de los cristales sería probablemente el resultado de soluciones mineralizantes muy concentradas sumado al descenso de temperatura asociado a eventos postectónicos durante la deformación pérmica (Tomezzoli, 2012). Estas condiciones afectan a las maderas fósiles de la cuenca y dan como resultado la deformación de las texturas en la fábrica diagenética de sus componentes. Las texturas deformadas identificadas en la imagen de la Fig. 6. a, no solo responde al reemplazo vegetal, sino que forman estructuras bandeadas curvadas o irregulares, con extinciones ondulantes y uniaxial (+) (Heinrich, 1965). Los procesos que llevan a la construcción de una fábrica diagenética (disolución, compactación) incluyen a todas las fábricas originadas por procesos capaces de producir cambios en la disposición geométrica de las partículas (George, 2015).

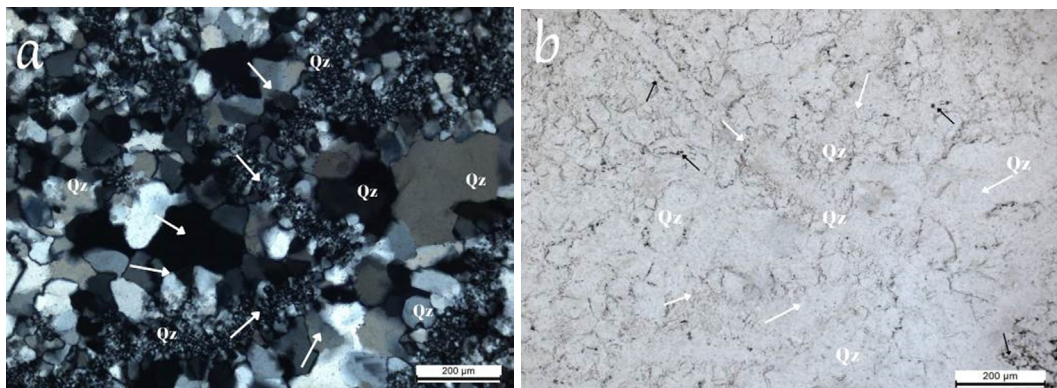


Fig. 6 a) Cristales de sílex con textura granular de tamaño grueso a medio y bandas de grano fino microcristalino a criptocristalino de cuarzo (Qz) que adoptan orientaciones preferentes (fábricas con estructuras bandeadas con extinciones ondulantes). Ambas texturas de grano grueso a criptocristalina siguen el mismo patrón de estructuras paralelas y concéntricas en el núcleo de la traqueida, en nicols cruzados=NX (flechas blancas). **b)** Fotomicrografía en nicols paralelos o luz polarizada=N//. (Se observa la textura vegetal reemplazados por sílex (flechas blancas) y pequeños granos oscuros tipo esferulitas (flechas negras). Secciones delgadas de la muestra. PMP-CTES N° 2167 y GHUNLPam N°3016.

Maderas petrificadas del área de Curacó (cercanía a Puelches)

Descripción microscópica: en la Figura 7 a y b, (nicoles cruzados y luz paralela) se muestra la imagen de la textura xenomórfica del cuarzo, con empaquetamiento denso, con escasos contactos cristalinos, siendo el principal factor de empaquetamiento (irregularidad de acople). La muestra fue posteriormente fracturada y el espacio relleno por calcita. Previamente, precipitaron óxidos de hierro (minerales opacos) en los bordes cristalinos del cuarzo (puede haberse producido por concentración de Fe^{2+} oxidación a Fe^{3+} , o simplemente por saturación).

En la Figura 7 c y d, se muestran estructuras bandeadas irregulares desarrolladas por la diferencia del tamaño de grano del cuarzo. El cuarzo más grueso se habría formado por mayor espacio disponible entre las traqueidas, o por menor concentración de SiO_2 disuelto en la solución mineralizante mientras que, el cuarzo fino, se habría formado como consecuencia de una mayor concentración de SiO_2 lo que hace variar las texturas. Un rol importante aquí es la baja temperatura (entre 15 y 40 °C).

Comentarios

En todas las muestras del área de Curacó (cercanía de Puelches) se identificó cuarzo. Las traqueidas observadas exponen relleno de cristal de cuarzo. La calcita se dispone paralela a las bandas de cuarzo de grano grueso a medio. El cuarzo de grano grueso presenta forma hipidiomórfica y por deformación adquiere formas xenomórficas (ameboidales) a medida que disminuye el tamaño de los granos (Fig. 7 a).

Interpretación

Es muy probable que el Silex originalmente haya sido un gel, luego se formó calcedonia (en alguna de sus fases cristalinas). Por el tiempo transcurrido desde el Pérmico no quedó nada más que cuarzo, aún en

las formas intersticiales. La calcita es muy posterior y llenó un hueco mucho después. También podría tener influencia la dirección del corte. Entre los contactos de los granos de cuarzo subautomorfos de mayores dimensiones se observa la disminución del tamaño de los cristales y la deformación de sus bordes con una marcada tendencia xenomórfica (Fig. 7. a y d); lo que indica de acuerdo con Hayase y Bengochea (1976) y con el Dr. Maiza (Com. pers.) que hubo recristalización durante el proceso de metasomatismo hasta ocupar regiones diferenciales en el tamaño de los minerales que se evidencia por las bandas de cuarzo microcristalino (Fig. 7. c). Los minerales opacos están presentes en contacto con el cuarzo de grano fino emplazado en los espacios intergranulares como relleno. En casi todas las muestras analizadas, los minerales expuestos permiten inferir que el sol de sílice amorfo penetró en los troncos y precipitó gel de sílice como ópalo (Hayase y Bengochea, 1976), dando lugar a la mineralización secundaria (silicificación), gradualmente la sílice fue transformándose en cristales de cuarzo. En las muestras analizadas de especímenes de la Formación Carapacha, existe reemplazo de la textura vegetal de los troncos fósiles por los fluidos mineralizantes, contenidos en los sedimentos y rocas pérmicas que a su vez fueron sometidas a deformación (Fig. 7. a y c). Esto se evidencia por la presencia de la orientación espacial preferencial de los minerales, que siguen estructuras en bandas paralelas unas de otras y muestran extinción ondulante; la misma se desarrolla por tensiones o presiones cuando se produce su precipitación, por procesos tectónicos posteriores, o por sepultamiento, etc. (Moreau, 2001). En este caso podría adjudicarse al crecimiento del cristal de cuarzo que viene de la calcedonia (cuarzo). Estos procesos de deformación indican dos eventos de mineralización diferentes: una primera etapa de silicificación por precipitación de los fluidos coloidales; cuando el árbol muere, las células se degradan progresivamente y la sílice penetra, sustituye y modifica molécula a molécula condicionando la estructura del tejido (Fig. 7. b). Si las transformaciones polimórficas de la sílice no se desarrollaran con las características planteadas (disminución del tamaño de la estructura cristalina), se perturbaría la morfología del tejido y hasta se destruiría; y una segunda etapa de deformación de los

minerales presentes por factor de empaquetamiento e irregularidad de acople, asociado a eventos postectónicos (Fig. 7. c y d); Parecen mostrar una zona de intersticios entre los cristales de cuarzo ocupado por el mineral opaco reemplazante (hematita) y que estuviera corroyendo al huésped. Respecto a los minerales secundarios, tanto Hayase y Bengochea (1976) como el Dr. Maiza (Com. pers.) coinciden en que la formación de calcita y hematita se produjo posiblemente en una edad posterior al Pérmico.

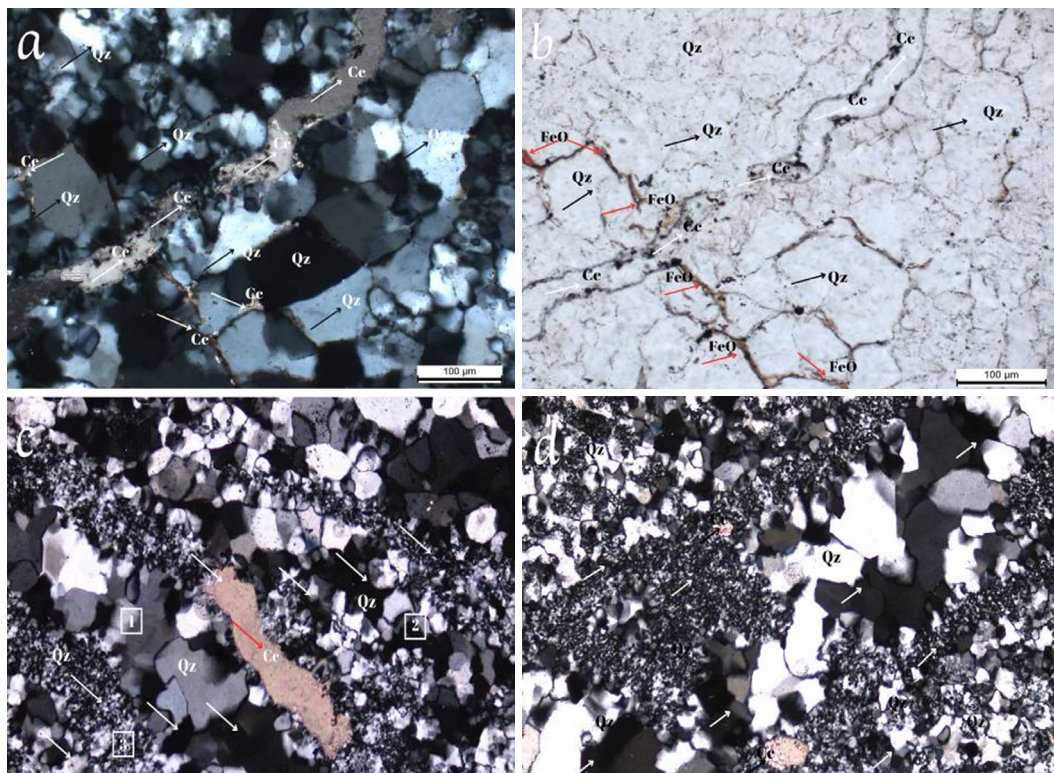


Fig. 7 a) En la imagen se distinguen cuarzo con textura xenomórficas y con textura granular (flechas negras) y calcita intersticial de alto relieve a manera de venilla que atraviesa los interespacios granulares y en los bordes de los cristales de cuarzo (flechas blancas) (En nicoles cruzados=NX). **b)** Ídem anterior, y aparecen minerales opacos como óxidos de hierro intergranular que ocupan los bordes subhedrales de cuarzo similar a tinciones pardas rojizas (flechas rojas) sin analizador N//. **c)** Se identifican 3 tipos de estructuras de bandas paralelas: (1) cuarzo de grano grueso xenomórfico que se alternan con bandas de grano medio a fino (2), y (3) cuarzo microcristalino a criptocristalino. La calcita se presenta como cristal agregado anhedral de alto relieve orientado paralelamente al patrón de la componente de fábrica de las estructuras en bandas de cuarzo (flechas blancas) (con polarizadores cruzados: NX). **d)** Se observan cristales de cuarzo anhedrales en bandas paralelas (flechas blancas), con crecimiento irregular de los minerales en el centro de la imagen (grano medio a fino) de bordes irregulares, rodeado de microcristales de cuarzo criptocristalino con empaquetamiento denso; también se observa inclusiones de minerales opacos y cristales de calcita tipo esferulitas subredondeadas de elevada birrefringencia (flechas negras) (NX). (Qz= cuarzo, Cc= calcita, FeO= óxido de hierro).

Difracción de Rayos X

Materiales: PMP-CTES N°2167 y GHUNLPam N°3016 (fragmentos II).

Las muestras (GHUNLPam N°3016: fragmento II) se analizaron en forma de polvo y se logró identificar 2 especies minerales como fases cristalinas. Cada fase está caracterizada por sus respectivas posiciones angulares e intensidades relativas o picos de difracción producido por una familia de planos atómicos. La posición de cada pico señala la distancia interplanar (d_{hkl}) de los cristales (Hansford *et al.*, 2017).

Comentarios de la DRX

El espectro característico obtenido que se incluye en la Figura 8; demuestra un cuarzo bien cristalizado con muy pequeñas impurezas de calcita ($2\theta=29^\circ$; Cu-K α). Es totalmente coincidente con la ficha ICDD 33-1161.

El espectro de cuarzo es igual al de la calcedonia por lo que podría estar superpuesto. Esta dualidad se eliminó ya que, al calentar la muestra a 600 °C, la calcedonia no presenta el punto de inversión a 573°C de cuarzo α o cuarzo β ; permitiendo confirmar que la muestra analizada es cuarzo α .

Las reflexiones características más importantes obtenidas de la muestra son: $d=3,34 \text{ \AA}$; $d=4,25 \text{ \AA}$ y $d=1,81 \text{ \AA}$ atribuibles al cuarzo, con picos que indican la cristalinidad del mineral presente (Kuczumow *et al.*, 2000). Como se observa en el Cuadro I, además se reconocen reflexiones concordantes con calcita con intensidades relativamente muy bajas en $d=3,03 \text{ \AA}$; $d=3,86 \text{ \AA}$ y $d=1,87 \text{ \AA}$; lo que puede indicar que se encuentra en cantidades muy bajas (Figura 8).

En el Cuadro 2 se muestran los valores obtenidos en el estudio por DRX. (No aparecen reflexiones de tridimita, ni de calcita ni modificación del fondo entre 18° y 30° (2θ ; Cu-K α)).

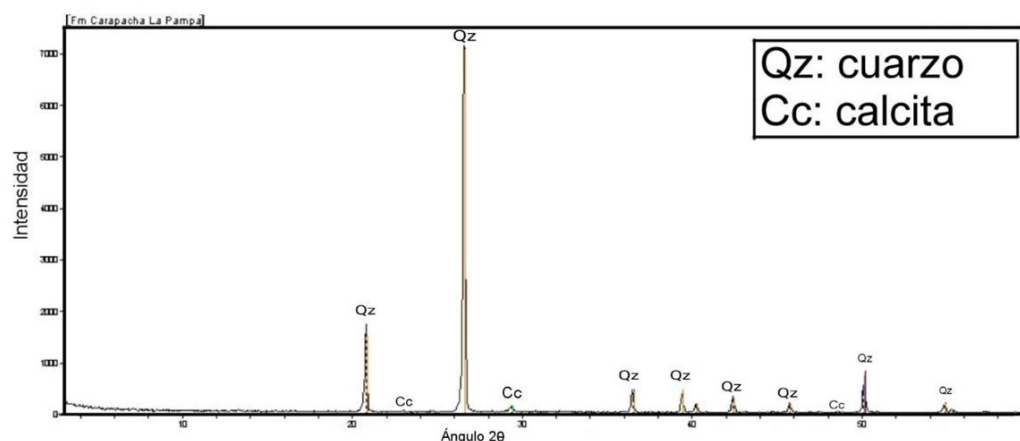


Fig. 8. Diffractograma correspondiente a la muestra de madera silicificada de la Formación Carapacha, La Pampa.

Cuadro 2. Ángulos de difracción medidos para los minerales de cuarzo y calcita de la muestra estudiada. Coincidente con la ficha ICDD 33-1161.

Formación Carapacha, La Pampa

ESCANEEO: 3.0/59.96/0.04/1 (seg), Cu, I(máx.)=7147, 26/09/23 02:28p.

PICO: 11 puntos/filtro parabólico, umbral = 3,0, límite = 0,1 %, BG-3/1,0, pico-cumbre superior.

NOTA: Conteos de intensidad, $2T(0)=0,0$ (grados), longitud de onda para calcular el espaciado $d=1,54059\text{Å}$ (Cu/K-alfa1).

#	Ángulo 2θ	d(Å)	Altura	Altura%	ID de fase	d(Å)	I%	(hkl)	Ángulo 2θ	Delta
1	20,835	4,2600	1687	23,8	Cuarzo	4,2537	16,5	100	20,866	0,031
2	23,046	3,8561	23	0,3	Calcita	3,86	12	0,12	23,022	-0,024
3	26,604	3,3479	7095	100	Cuarzo	3,3428	100	0,11	26,645	0,041
4	29,396	3,0359	107	1,5	Calcita	3,035	100	104	29,405	0,009
5	36,514	2,4588	428	6	Cuarzo	2,4559	6,9	110	36,559	0,045
6	39,433	2,2832	347	4,9	Cuarzo	2,2816	6,7	102	39,464	0,030
7	40,250	2,2388	163	2,3	Cuarzo	2,2358	2,1	111	40,306	0,056
8	42,409	2,1297	307	4,3	Cuarzo	2,1269	3,5	200	42,467	0,058
9	45,736	1,9822	183	2,6	Cuarzo	1,9791	1,9	021	45,812	0,076
10	48,655	1,8699	22	0,3	Calcita	1,875	17	116	48,513	-0,142
11	50,091	1,8196	533	7,5	Cuarzo	1,8177	10,8	112	50,147	0,056
12	54,837	1,6728	149	2,1	Cuarzo	1,6714	2,8	022	54,886	0,049
13	55,306	1,6597	64	0,9	Cuarzo	1,6595	1,5	013	55,315	0,009

Cambios de línea de fases individuales:

01-085-0796> Cuarzo SiO₂ <2T(0) = 0,0, d/d(0) 1,0> **01-085-0930** Cuarzo SiO₂ <2T(0) = 0,0, d/d(0) 1,0> **00-005-0586**> Calcita CaCO₃ <2T(0) = 0,0, d/d(0) = 1,0>

Comparación

Las modificaciones diagenéticas de los minerales de los troncos analizados podrían ser el caso de aquellas maderas transportadas, asociadas a intervalos de poca potencia de conglomerados y areniscas o brecha intraformacional de los miembros Urre-Lauquen y Calencó que componen la Formación Carapacha (Melchor, 1995).

En una primera etapa, en las secciones delgadas estudiadas, los minerales habrían penetrado la estructura de la madera, reemplazando la textura orgánica. Debido a la temperatura de los sedimentos donde se produce el proceso mineralizador los minerales presentan variaciones geométricas, probablemente porque han cristalizado a baja temperatura (Hayase y Bengochea, 1976) afectando el desarrollo de la formación de estructuras cristalinas y amorfas, que podrían ser causadas por la variación de bajas presiones litostáticas y temperatura ambiental (en un rango entre 10 °C hasta los 75 °C) (Sato, 1964).

En una segunda etapa, la evidencia de deformación de los minerales subhedrales a anhedrales (Figura 7. c y d), siguen un mismo patrón de fábrica diagenética de estructuras de bandas irregulares, lo que indica que al menos, en la zona de estudio, ocurrieron deformaciones como lo confirma Tomezzoli (2012).

Aspectos paleoambientales: al examinar los leños fósiles se puede observar características macroscópicas (Fig. 5), micromorfológicas y mineralógicas (Figs. 6 y 7) con inferencias geoquímicas en los cambios de línea de fases cristalinas (Cuadro 2). La caracterización físicoquímica proporciona detalles sobre el entorno antiguo en el que existieron los árboles fósiles. Los minerales identificados en este trabajo, que están presentes en los leños de la cuenca de Carapacha parecen haber ocupado la compartimentización de la médula diafragmada emplazados en los espacios intergranulares con crecimiento de cristales de cuarzo hipidiomórficos de buen tamaño que disminuyen a dimensiones de cuarzo microcristalino con bordes xenomórficos (Fig. 7) (Dr. Maiza Com. pers.). Este tipo de metasomatismo en plantas no xerófitas con adaptaciones xeromórficas (Crisafulli *et al.*,

2000) puede indicar un ambiente desfavorable para el desarrollo de la biota pampeana, podría deberse a la presencia de agua estancada, o salobres, o por condiciones de escaso drenaje (Scasso y Limarino, 1997).

Aspectos paleoclimáticos: los taxones sometidos en el emplazamiento mineralógico habrían acontecidos en ambientes cálidos y con limitada humedad (Coelho Dos Santos, 2018).

Por vía óptica se constatan fenómenos de oxidación secundaria con formación de hematita que sugiere condiciones de clima relativamente muy seco (Klein y Hurlut 1998). La calcita caracterizada en los espacios intersticiales de los especímenes de Curacó en esta investigación (Fig. 7. a y c), se dispone paralela a las bandas de cuarzo que podrían estar relacionados con la salinidad del agua, los niveles de CO₂ atmosférico y otros factores climáticos (Searl y Boggs, 1992).

Aspectos paleobiogeográficos: el provincialismo de la biota es inducido por los eventos tecto-sedimentarios que se alinean a secuencias de la provincia Gondwana con los patrones globales entre el Pérmico Inferior bajo y el Pérmico Superior bajo. Cada taxón paleoflorístico corresponde a un período de estabilidad climática (Pettijhon et al., 1987). La parte superior de la Formación Carapacha (área de Puelches-Curacó) está intruida por una andesita asignada a la Formación El Centinela, asociada al Pérmico-Triásico del Grupo Choiyoi (Melchor, 1995) (Fig.3). Además de las maderas fósiles mencionadas en este trabajo, se han encontrado asociaciones megaflorísticas de *Glossopteris* características del Pérmico de dicha unidad; pertenecientes a la tafoflora del Miembro Urre-Lauquen del Pérmico Superior bajo, aflorante sobre el río Curacó en las inmediaciones de la localidad de Puelches, y el Miembro Calencó del Pérmico Inferior bajo aflorante en el área de la Estancia San Roberto (Crisafulli *et al.*, 2000) (Figs. 2 y 3).

CONCLUSIONES

Al microscopio se observó cristalizaciones a manera de esferulitas, venillas y parches de calcita, formadas (posteriormente) en huecos o poros de los fósiles. Las muestras analizadas están constituidas por cuarzo α .

El contenido de hierro del material orgánico y quizás algún aporte extra de los sedimentos o fluidos mineralizantes pudieron producir colores pardos a los ejemplares estudiados, simultáneamente a la silicificación, o posteriormente en las imperfecciones y fracturas de los elementos fosilizados.

En estas muestras no se observaron formas fibrosas de sílice, por lo que el proceso de fosilización culmina con la transformación de la sílice en su forma estable, cuarzo.

A través de este estudio es posible concluir que los troncos fósiles fueron desarrollados durante un clima cálido, seco y poco húmedo, con ambientes áridos o semiáridos y en condiciones atmosféricas de oxigenación moderada, asociada a la deformación pérmica de la cuenca Carapacha a lo largo de todo el margen sudoccidental del Gondwana, y que fue afectado por la fase orogénica San Rafael. Estos fueron los principales factores de control en el desarrollo de la petrificación de los leños y la diagénesis que debió haber sido transicional a extensivo

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen especialmente a la Lic. Constanza Bournod y a la Dra. Leticia Lezcano por la colaboración en la obtención y compaginación de las fotomicrografías, al Técnico Rodolfo Salomón y a la Dra. Silvina Marfil. Un reconocimiento especial para el Dr. Pedro Maiza por la generosidad al compartir sus saberes y por la cortesía en permitir el uso del equipo de rayos X y microscopía petrográfica (Universidad Nacional del Sur, Bs. As). Hacemos extensiva nuestra gratitud al Dr. Ricardo Melchor (Universidad Nacional de La Pampa) que nos permitió estudiar los materiales colectados, al Est. Emiliano Rubio UNSa, Salta, Argentina, por la colaboración en la confección de los mapas (SIG) y al Técnico

del Laboratorio de Petrotomía (UNS) Heraclio Ortiz, sin sus atenciones no hubiera sido factible la elaboración de este trabajo. Por último, unas palabras de agradecimiento para la dedicada y generosa labor de los revisores que contribuyeron a mejorar la calidad de este manuscrito.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Baez, E.: análisis, interpretación, redacción, ilustración y compaginación.
Crisafulli, A.: colección de material, interpretación, compaginación y redacción.

Kanbour, A.: redacción, ilustración y compaginación.

Zuliani, P.: determinación sistemática, redacción y compaginación.

Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bustillo, M., R. García y M. Pérez. 2000. Caracterización y respuesta al tratamiento térmico de rocas silíceas opalinas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, ISSN0366-3175, Vol. 39, N.º 6, págs. 741-746. 39. 10.3989/cyv. v39.i6.775.

Chernicoff, C.J., E. O. Zappettini, J. O. S. Santos, E. Beyer y N. J. McNaughton. 2008. Foreland basin deposits associated with Cuyania accretion in La Pampa Province, Argentina. *Gondwana Research*, 13: 189-203400.

Coelho Dos Santos, G. S. 2018. Tesis Doctor en Geología "Comportamiento de las rocas cuarcíticas de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción álcali - sílice (RAS)". *Universidad Nacional del Sur*, Bahía Blanca, Argentina.

Crisafulli, A., A. I. Lutz, R. N. Melchor. 2000. Maderas gimnospérmicas de la Formación Carapacha (Pérmico), provincia de La Pampa, Argentina; Asociación Paleontológica Argentina. *Ameghiniana*, 37: 181-191.

Demoustier, A., R. Castroviejo y J. M. Charlet. 1998. Geología Clasificación Textural del Cuarzo Epitermal (Au-Ag) de relleno Filoniano del Área Volcánica de Cabo de Gata, Almería. *Boletín Geológico y Minero*, 109: 5-6: 449-468.

- George, E.M. 2015. Late Tertiary petrified wood from Nevada, USA: Evidence of multiple silicification pathways. *Geosciences*, 5: 286-309.
- Hansford, G.M., S. Turner, P. Degryse, y A. J. Shortland. 2017. High-resolution X-ray diffraction with no sample preparation. *Acta crystallographica. Section A*, Foundations and advances, 73: 293-311.
- Hayase, K., y A. L. Bengochea. 1976. Estudio mineralógico de madera petrificada. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, VII, 3-4: 36-70.
- Heinrich, E.W. 1965. *Microscopic Identification of Minerals*. McGraw-Hill, New York, 414 p.
- Klein, C., C. Hurlbut. 1998. *Manual de mineralogía*. Translated by J. Aguilar Peris Edition 4. Ed. Reverté. 390 p.
- Kuczumow A., P. Chevallier, P. Dillmannb, P. Wajnberg y M. Rudaś. 2000. "Investigation of petrified wood by synchrotron X-ray fluorescence and diffraction methods". *Spectrochim, acta B*.55: 1623-1633.
- Lozano Fernández, R. P., R. Jiménez Martínez, R. González Laguna, A. Paradas Herrero, y E. Baeza Chico. 2011. Revisión de la terminología utilizada en la exposición pública de minerales españoles del Museo Geominero (IGME, Madrid). *Boletín Geológico*.
- Melchor, R. 1995. *Sedimentología de las unidades paleozoicas aflorantes del centro-oeste de la provincia de La Pampa, Argentina*. Universidad Nacional de la Plata, Tesis Doctoral, 272 p. Inédito.
- Melchor, R. N. 1999. Redefinición estratigráfica de la Formación Carapacha (Pérmico), Provincia de La Pampa, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54: 99-108.
- Melchor, R. 2000. Redefinición estratigráfica de la formación Carapacha (Pérmico), provincia de La Pampa. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54: 469-478.
- Mitchell, R. S. 1967. Tridymite pseudomorphs After Wood in Virginian Lower Cretaceous Sediments. *Science*, 158: 905-906.

- Mitchell, R. S y S. Tufts 1973. Wood Opal. A Tridymite-like Mineral. *The American Mineralogist*, 58: 717-720.
- Moreau, A. 2001. *Gênese, mineralogia e micromorfologia de horizontes coesos, fragipã e duripã em solos dos Tabuleiros Costeiros do Sul da Bahia*. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 138p. (Tese de Doutorado)
- Pettijohn F., P. Potter y R. Siever. 1987. Sand and sandstone. *Springer*. New York. 2º ed. 630p.
- Rapalini, A.E., S. Fazzito y D. Orué. 2006. A new Late Permian paleomagnetic pole for stable South America: the Independencia Group, eastern Paraguay. *Earth and Planets Space Special*, 58: 1247-1253.
- Sato, M. 1964. X-ray Study of Tridymite (3) Unit Cell Dimensions and phase transition of Tridymite, type S. *Mineralogical Journal; The Mineralogical Society of Japan*, 4: 215-225.
- Scasso, R. A., C. O. Limarino. 1997. Petrología y Diagénesis de Rocas Clásticas. *Asociación Argentina de Sedimentología*. Publicación especial, 260 p.
- Searl, A., S. Boggs Jr. 1992. Petrología de Rocas Sedimentarias. xi + 707 págs. Nueva York, Oxford, Singapur, Sídney: *Maxwell Macmillan International*. *Revista Geológica*, 131:429-429. Doi: 10.1017/S0016756800011298.
- Taliaferro, N. L. 1935. Some Properties of Opal. *American Journal of Science*, 30: 450-474.
- Tickyj, H., L. V. Dimieri, E. J. Llambías y A. M. Sato. 1997. Cerro de los Viejos (38° 28' S - 64°26'O): cizallamiento dúctil en el sudeste de La Pampa. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52: 311-321.
- Tomezzoli, R.N. 2009. The Apparent Polar Wander Path for South America during the Permian-Triassic. *Gondwana Research*, 15: 209- 215.
- Tomezzoli, R.N. 2012. Chilenia y Patagonia: ¿un mismo continente a la deriva? *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69: 222-239.

Tomezzoli, R. N., R. N. Melchory W. D. MacDonald. 2006. Tectonic implications of post-folding Permian magnetizations in the Carapacha Basin, La Pampa province, Argentina. *Earth Planets Space*, 58: 1235-1246.