



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Nuevos Aportes al Entendimiento de la Evolución Geotectónica del Noroccidente Colombiano Mediante el Estudio Petrográfico y Geoquímico del Basamento de la Cuenca Sinú- San Jacinto

Lady Marcela Gómez Gualdrón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C., Colombia

2022

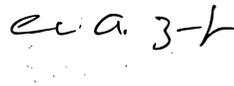
Nuevos Aportes al Entendimiento de la Evolución Geotectónica del Noroccidente Colombiano Mediante el Estudio Petrográfico y Geoquímico del Basamento de la Cuenca Sinú- San Jacinto

Lady Marcela Gómez Gualdrón

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Geología

Director:

Ph.D. Carlos Augusto Zuluaga Castrillón



Línea de Investigación:

Rocas metamórficas

Grupo de Investigación:

Técnicas aplicadas a tectónica y análisis de cuencas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá D.C., Colombia

2022

A mi hija Antonia y a mi esposo Harvey

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Lady Marcela Gómez Gualdrón

28/06/2022

Agradecimientos

Gracias a Hocol S.A, por haber suministrado las secciones delgadas pulidas e información complementaria del pozo Las Lauras, sobre las cuales se basó este trabajo. Al profesor Carlos Augusto Zuluaga por dirigir esta tesis de maestría. A Sergio Amaya Ferreira por toda la colaboración prestada durante el desarrollo del presente trabajo.

Resumen

Nuevos Aportes al Entendimiento de la Evolución Geotectónica del Noroccidente Colombiano Mediante el Estudio Petrográfico y Geoquímico del Basamento de la Cuenca Sinú-San Jacinto

El basamento de la cuenca Sinú-San Jacinto recuperado en el pozo estratigráfico Las Lauras, está compuesto por serpentinitas con diferentes grados de alteración que van desde 25 a 100%, cuyo protolito más probable fueron lherzolitas, harzburgitas y piroxenitas, las demás rocas encontradas son rodingitas. Las serpentinitas presentan dos eventos de hidratación cuyo resultado son dos texturas diferentes de serpentinización que son, la textura pseudomorfa y la no pseudomorfa. La serpentinita pseudomorfa está dominada por lizardita y crisotilo que son serpentinas de baja temperatura (0 a 300°C) y la serpentinita no pseudomorfa está dominada por una transición entre lizardita y antigorita, esta última es la serpentinita de alta temperatura (>320°C). El #Cr en las espinelas está entre 0.30 y 0.45, relacionado con bajos porcentajes de fusión parcial del manto tipo dorsal medio oceánica. Los oligoelementos en las serpentinitas y piroxenitas están empobrecidos respecto al manto primitivo, mientras que en la rodingita están enriquecidos y reflejan un ambiente de arco de islas oceánicas. Las serpentinitas de lizardita y antigorita muestran patrones de distribución similares a las serpentinitas abisales de todo el mundo, sin embargo, la serpentinita de antigorita tiene también similitud con las serpentinitas subducidas, lo que pudo ser el resultado de la segunda hidratación al momento de la colisión entre las placas Caribe y Suramericana. La variabilidad en la composición y alteración de las rocas recuperadas del pozo se debe a la compleja configuración tectónica de la zona de estudio.

X Nuevos Aportes al Entendimiento de la Evolución Geotectónica del Noroccidente Colombiano Mediante el Estudio Petrográfico y Geoquímico del Basamento de la Cuenca Sinú-San Jacinto

Palabras clave: serpentinita, antigorita, lizardita, espinela, abisal, piroxenita, rodingita.

Abstract

New Contributions to the Understanding of the Geotectonic Evolution of Northwestern Colombia Through the Petrographic and Geochemical Study of the Basement of the Sinú-San Jacinto Basin

The basement of the Sinú-San Jacinto basin drilled in the Las Lauras stratigraphic hole, is composed of serpentinites with different degrees of alteration ranging from 60 to 100%, whose most likely protolith were lherzolites, harzburgites and pyroxenites, the other rocks found are rhodinites. The serpentinites present two hydration events which result in two different textures of serpentinization that are the pseudomorphic texture and the non-pseudomorphic texture. Pseudomorphic serpentine is dominated by lizardite and chrysotile which are low temperature serpentine (0 to 300°C) and the non-pseudomorphic serpentine is dominated by a transition between lizardite and antigorite, the latter being the high-temperature serpentine (>300°C). The #Cr in the spinels is between 0.30 and 0.45, related to low percentages of partial melting of the mantle like a mid-ocean ridge. Trace elements in serpentinites and pyroxenites are depleted relative to the primitive mantle, while in rhodinite they are enriched and reflect an oceanic island arc environment. Lizardite and antigorite serpentinites show distribution patterns like abyssal serpentinites from around the world, however, the antigorite serpentinite also bears similarities to the subducted serpentinites, what could be the result of the second hydration at the time of the collision between the Caribbean and South American plates. The variability in the composition and alteration of the hole is due to the complex tectonic configuration of the study area.

Keywords: serpentinite, antigorite, lizardite, spinel, abyssal, pyroxenite, rodignite.

XII Nuevos Aportes al Entendimiento de la Evolución Geotectónica del Noroccidente Colombiano Mediante el Estudio Petrográfico y Geoquímico del Basamento de la Cuenca Sinú-San Jacinto

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XV
Lista de símbolos y abreviaturas	XVII
1. Introducción	1
2. Antecedentes geológicos	4
3. Metodología	7
3.1 Muestreo	7
3.2 Petrografía y metalografía	7
3.3 Espectroscopía Raman	7
3.4 Química mineral	8
3.5 Geoquímica de roca total	8
4. Resultados	9
4.1 Petrografía	9
4.1.1 Peridotitas.....	9
4.1.2 Gabros.....	11
4.1.3 Rodingita	12
4.1.4 Alteración Hidrotermal	13
4.2 Espectroscopía Raman	22
4.3 Química mineral	27
4.3.1 Grupo de la espinela.....	27
4.3.2 Olivinos.....	39
4.3.3 Piroxenos.....	43
4.3.4 Serpentinás	41
4.4 Geoquímica de roca total	45
5. Discusión	51
5.1 Implicaciones regionales	55
6. Conclusiones	61
Bibliografía	63

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Mapa geológico del departamento de Córdoba, tomado de (Londoño & González, 1997).....	2
Figura 1-2: Diagrama de caracterización geoquímica de las serpentinitas en los diferentes ambientes de formación, (Deschamps et al., 2013)	3
Figura 2-1: Diagrama esquemático de la configuración actual de la zona de estudio (Mantilla, 2007)	5
Figura 4-1: Relictos de minerales primarios de las peridotitas serpentinizadas en luz transmitida, XPL. (a) piroxeno alterándose a serpentina (muestra Las Lauras IX 715.25), (b) olivino fracturado con bordes de serpentina y piroxeno alterándose a serpentina (muestra Las Lauras IX 916.91).....	9
Figura 4-2: Forma y disposición de las espinelas, a) muestra Las Lauras IX 1065.33, luz transmitida PPL, b) muestra Las Lauras IX 1065.33, Luz reflejada, c) muestra Las Lauras IX 2261.16, luz transmitida PPL y d) muestra Las Lauras IX 2261.16, luz reflejada	10
Figura 4-3: Gabros cortados por venas de serpentina, bajo luz transmitida XPL, en la muestra Las Lauras IX 1025.75, a) olivinos, b) venas de serpentina.....	11
Figura 4-4: Fenocristales de prehnita-talco y piroxeno en una matriz de epidota y vesuvianita, bajo luz transmitida XPL, a y b) muestra Las Lauras IX 368.91, c y d) muestra Las Lauras IX 372.58	12
Figura 4-5: Textura pseudomorfa, bajo luz transmitida, XPL, a) muestra Las Lauras IX 1417, b) muestra Las Lauras IX 873.16, c) muestra Las Lauras IX 2142.75, d) muestra Las Lauras IX 2264.....	14
Figura 4-6: Malla de serpentina sobreimpuesta. Luz transmitida, XPL, muestra Las Lauras IX 2068.91.....	15
Figura 4-7: Texturas de alteración en las espinelas bajo luz reflejada, a) muestra Las Lauras IX 2261.16, b) muestra Las Lauras IX 283.5, c) muestra Las Lauras IX 715.25, d) muestra Las Lauras IX 883.66	15
Figura 4-8: Sulfuros diseminados, en luz reflejada, a) muestra Las Lauras IX 1566.41, b) muestra Las Lauras IX 1417	16
Figura 4-9: Ocurrencia de magnetita (mineral más reflectante) en la textura pseudomorfa bajo luz reflejada, a) muestra Las Lauras IX 756.41, b) muestra Las Lauras IX 1282.33, c) muestra Las Lauras IX 2164.33, d) muestra Las Lauras IX 2264.....	17

Figura 4-10: Serpentinización no pseudomorfa en luz transmitida XPL (a), intercrecida con cloritas, muestra Las Lauras IX 1712.33 (b), talco, muestra Las Lauras IX 1712.33, c) magnetita (opaco), muestra Las Lauras IX 2068.91, d) kammererita, muestra Las Lauras IX 1712.33.....	17
Figura 4-11: texturas y formas de la serpentinización no pseudomorfa en luz transmitida XPL, a) muestra Las Lauras IX 601.5, b) muestra Las Lauras IX 777.58, c) muestra Las Lauras IX 916.91, d) muestra Las Lauras IX 529.75, e) muestra Las Lauras IX 777.58, f) muestra Las Lauras IX 1925.75.....	18
Figura 4-12: Magnetita en el proceso de alteración no pseudomorfa, a) luz transmitida PPL, muestra Las Lauras IX 1796, b) luz reflejada, muestra Las Lauras IX 1796 c y d) luz transmitida PPL y XPL, muestra Las Lauras IX 1257.25, e y f) luz transmitida PPL y XPL, muestra Las Lauras IX 777.58.....	19
Figura 4-13: Tipos y texturas en venas de serpentina, luz transmitida XPL, a) muestra Las Lauras IX 715.25, b) muestra Las Lauras IX 1114.83, c) muestra Las Lauras IX 1282.33, d) muestra Las Lauras IX 1925.75, e) muestra Las Lauras IX 647.33, f) muestra Las Lauras IX 2261.16.....	21
Figura 4-14: Espectros Raman de la malla de serpentina en la muestra Las Lauras IX 1114.83. a) parte central de la malla de serpentina compuesta por crisotilo, b) parte más externa de la malla de serpentina compuesta por lizardita	23
Figura 4-15: Espectros Raman de la alteración en los piroxenos. a) bastitas en enstatitas compuestas por crisotilo en la muestra Las Lauras IX 1925.75, b) corona de alteración en los piroxenos compuesta por antigorita en la muestra Las Lauras IX 777.58	24
Figura 4-16: Espectros Raman de la textura no pseudomorfa en la muestra Las Lauras IX 1712.33. a) serpentina interconectada-interpenetrativa compuesta por antigorita, b) clinopiroxenos alterados a kammererita	24
Figura 4-17: Espectro Raman del mineral de alteración más proximal en la textura en corona de la espinela en la muestra Las Lauras IX 777.58	25
Figura 4-18: espectro Raman de la vena tipo 2 en la muestra Las Lauras 1114.83.....	26
Figura 4-19: Mapas composicionales de espinelas no porosas con borde de magnetita, muestra Las Lauras IX 647.33.....	35
Figura 4-20: Mapas composicionales de las espinelas porosas zonadas, muestra Las Lauras IX 1949.41	35
Figura 4-21: Mapas composicionales de las espinelas porosas, muestra Las Lauras IX 2261.16	36
Figura 4-22: Mapas composicionales de las espinelas porosas con corona de clorita, muestra Las Lauras IX 777.58.....	37
Figura 4-23: Diagrama de variación Fe ³⁺ -Al-Cr para las espinelas, grupo I: centros de espinelas, grupo II espinela con corona de clorita, grupo III bordes alterados de las espinelas no porosas y grupo IV espinela totalmente porosa	39
Figura 4-24: Relación entre el porcentaje de forsterita y el contenido de óxidos mayores de NiO y MnO	40
Figura 4-25: Clasificación de piroxenos.....	41
Figura 4-26: Distribución de óxidos mayores en las serpentinas	45
Figura 4-27: diagrama de clasificación SiO ₂ vs. Na ₂ O+K ₂ O para rocas plutónicas	47

Figura 4-28: Diagramas de clasificación composicional y geotectónica para basaltos	49
Figura 4-29: patrones de distribución de elementos de tierras raras y elementos traza en las muestras analizadas.....	50
Figura 5-1: Diagrama de presión-temperatura con los campos de estabilidad de las serpentinas de (Guillot et al., 2015).....	51
Figura 5-2: Patrones comparativos entre las serpentinitas de la cuña del manto, subducidas y abisales de Deschamps et al. (2012) en gris , respectos a las serpentinitas de Las Lauras en colores.	53
Figura 5-3: Distribución generalizada de la alteración a lo largo del pozo estratigráfico Las Lauras.....	55
Figura 5-4: Cuerpos de rocas ultramáficas y serpentinitas de la cordillera central y occidental. Modificado de (Gómez Tapias & Montes Ramírez, 2020; Sepúlveda et al., 2020)	57
Figura 5-5: Diagrama esquemático de placas tectónicas, que representa los principales escenarios de construcción magmática de la litosfera oceánica. Modificado de Furnes & Dilek (2017).	59

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 4-1: Resultados promedio de los análisis EPMA en las espinelas	27
Tabla 4-2: Caracterización de las espinelas	28
Tabla 4-3: Resultados de los análisis EPMA a los olivinos	39
Tabla 4-4: Contenido de óxidos en los piroxenos	43
Tabla 4-5: Rango de porcentaje en peso de óxidos analizados en las serpentinas	42
Tabla 4-6 Resultados de los análisis para óxidos mayores, elementos de tierras raras y elementos traza.....	45

Lista de símbolos y abreviaturas

Superíndices

Superíndice	Término
--------------------	----------------

+2, +3	Estado de oxidación
T	Total

Abreviaturas

Abreviatura Término

<i>Alt.</i>	Alterado
<i>ANH</i>	Agencia Nacional de Hidrocarburos
<i>Atg</i>	Antigorita
<i>Chl</i>	Clorita
<i>Cpx</i>	Clinopiroxeno
<i>En</i>	Enstatita
<i>Ep</i>	Epidota
<i>EPMA</i>	Microsonda electrónica
<i>Fa</i>	Fayalita
<i>FME</i>	Elementos móviles del fluido
<i>Fo</i>	Forsterita
<i>Fs</i>	Ferrosilita
<i>HREE</i>	Tierras raras pesadas
<i>ICP-MS</i>	espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente
<i>Liz</i>	Lizardita
<i>LOI</i>	Perdida por ignición
<i>LREE</i>	Tierras raras ligeras
<i>mm</i>	Milímetros
<i>Mt</i>	Magnetita
<i>NMORB</i>	Basaltos de dorsal medio oceánica normal
<i>Oi</i>	Olivino
<i>Opx</i>	Ortopiroxeno
<i>PPL</i>	Luz polarizada plana
<i>ppm</i>	Partes por millón
<i>Prh-Tc</i>	Prhenita-Talco
<i>Px</i>	Piroxeno
<i>REE</i>	Elementos de tierras raras
<i>Serp</i>	Serpentina
<i>Sp</i>	Espinela
<i>Vs</i>	Vesuvianita
<i>Wo</i>	Wollastonita
<i>XPL</i>	Luz polarizada cruzada
<i>XRF</i>	Fluorescencia de rayos X
<i>%wt</i>	Porcentaje en peso
σ	Desviación estándar

1.Introducción

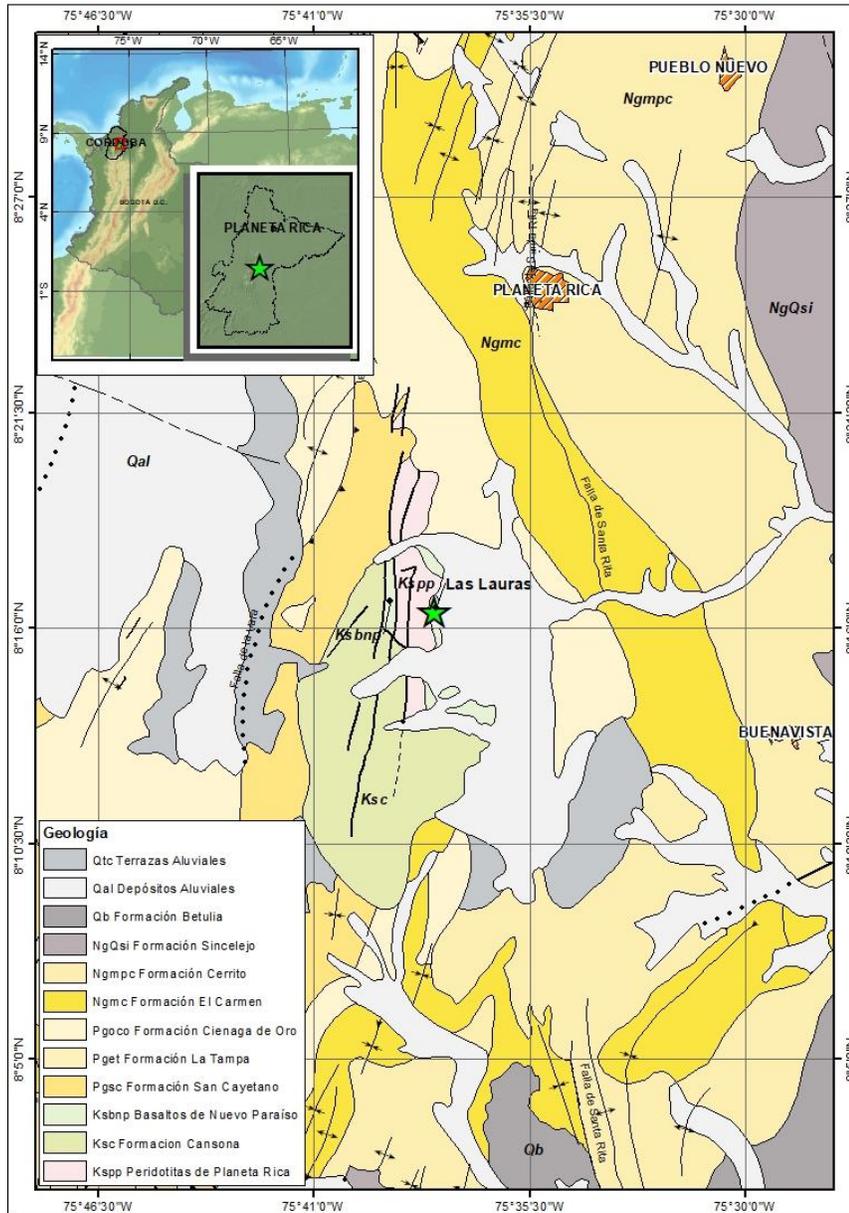
Las rocas del basamento de la cuenca Sinú-San Jacinto que fueron recuperadas del pozo estratigráfico “Las Lauras” corresponden a rocas ultramáficas tipo peridotitas, alteradas a serpentinitas. Estas rocas se originan en ambientes geotectónicos restringidos y están asociadas con corteza oceánica. Los estudios realizados anteriormente en la cuenca no indican con claridad si el basamento de la cuenca es oceánico o continental por la falta de afloramientos de estas rocas. Los estudios publicados interpretan una parte de la zona de estudio como parte de la placa Caribe (corteza oceánica) pero las secuencias sedimentarias de la cuenca indican que la fuente de aporte de los sedimentos es de tipo continental. Al no tener suficientes datos con la información del basamento, los modelos de evolución tectónica se basan en datos sísmicos, anomalías de Bouguer, la caracterización de los sedimentos que componen la cuenca y los resultados obtenidos en el basamento de los terrenos adyacentes.

Gracias al interés del país en la búsqueda de hidrocarburos se han realizado una gran cantidad de pozos estratigráficos con el fin de conocer las características reológicas, estructurales y mecánicas del subsuelo en la parte noroccidental de Colombia. Las principales zonas de interés para prospectar hidrocarburos son las cuencas sedimentarias; sin embargo, es necesario conocer y entender el origen y la evolución de estas para así disminuir el riesgo en la exploración de hidrocarburos.

Las muestras de roca sobre las cuales se basa esta tesis se encuentran en la parte noroccidental de Colombia, en el departamento de Córdoba, municipio de Planeta Rica. En esta zona afloran rocas volcánicas y secuencias sedimentarias entre las cuales se encuentran los cuerpos de rocas ultramáficas (Figura 1-1). Las rocas identificadas son

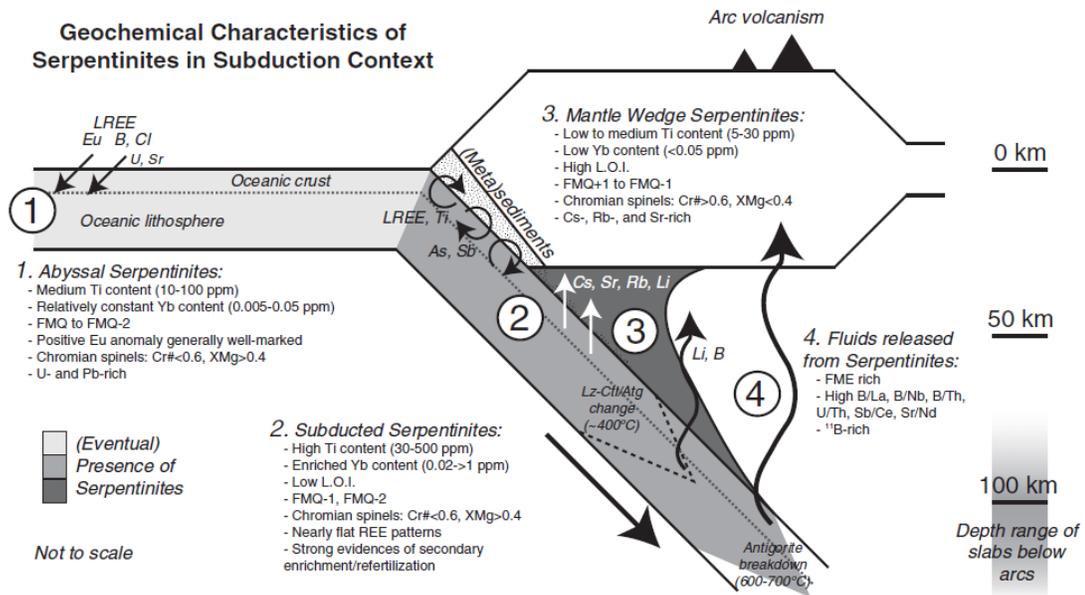
principalmente ultramáficas y en menor cantidad máficas y volcánicas, éstas presentan diferentes grados de serpentización con paragénesis minerales propias de la temperatura y composición del fluido.

Figura 1-1: Mapa geológico del departamento de Córdoba, tomado de (Londoño & González, 1997)



Las rocas ultramáficas al entrar en contacto con fluidos se serpentinizan, el agua que hidrata las peridotitas para formar las serpentinitas puede venir de diferentes ambientes como por ejemplo la columna de agua de mar en las dorsales medio oceánicas, el agua de los sedimentos de las cuencas de antearco que se infiltra en las fracturas generadas por la flexura de la placa que se subduce y el agua liberada por la deshidratación de la placa al entrar en contacto con la cuña del manto (Figura 1-2) (Deschamps et al., 2013). El objetivo de estudiar las serpentinitas es poder determinar su protolito y su historia geológica antes de la serpentinización (Deschamps et al., 2010). Sin embargo, muchas veces no es posible hacerlo debido a los pocos afloramientos que se pueden encontrar en superficie o la superposición de eventos geológicos que experimentó la roca hasta su configuración actual.

Figura 1-2: Diagrama de caracterización geoquímica de las serpentinitas en los diferentes ambientes de formación, (Deschamps et al., 2013)



El estudio petrográfico y geoquímico de los núcleos del pozo estratigráfico Las Lauras (Planeta Rica, Córdoba) permitió caracterizar el basamento de la cuenca Sinú-San Jacinto para así poder comprender mejor el origen y la historia evolutiva de esta zona. Este estudio contribuirá al entendimiento de la configuración actual de la parte noroccidental de Colombia.

2. Antecedentes geológicos

La configuración compleja de la parte noroccidental de Colombia se ha estudiado desde hace más de cincuenta años en el marco de tres modelos propuestos para la evolución geotectónica de las placas Caribe y Suramericana. Uno de los modelos propone un origen in situ para la placa Caribe, originada cuando la placa Norteamericana se separó de la Suramericana y migró hacia el noroeste de Gondwana desde el Jurásico al Cretácico temprano. Los otros modelos sugieren un origen Pacífico para la placa Caribe con diversidad de interpretaciones de la arquitectura de la colisión. Uno de estos propone que la placa Caribe se unió a la parte noroeste de Suramérica durante la separación de Norte América de Sur América, por medio de fallas transformantes como resultado de una colisión oblicua (Ardila & Diaz, 2015). Otro modelo propuesto sugiere que la placa Caribe está siendo subducida con bajo ángulo debajo de la placa Suramericana (Cardona et al., 2018; Duque-caro, 1984; Flinch, 2003; Lara et al., 2013; Mantilla, 2007; Mora, 2018).

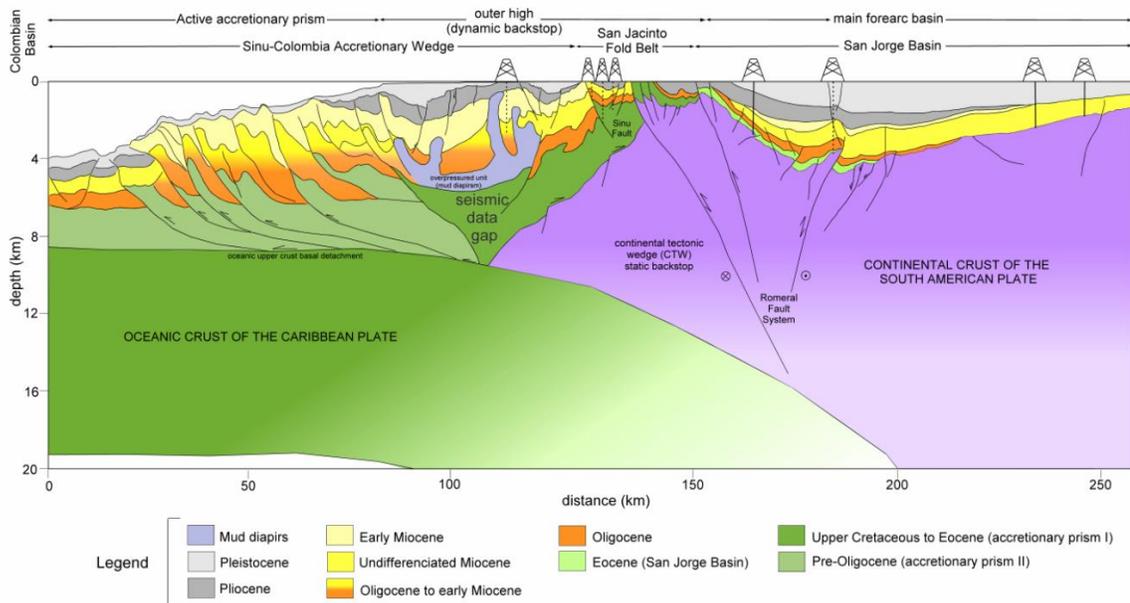
Lara et al. (2013), sugieren un modelo de desgarre de placa ("*slab tear*") para la subducción de la placa Caribe debajo de la placa Suramericana, donde uno de los fragmentos de la placa es subducido debajo del bloque de Panamá formando el cinturón deformado del norte de Panamá y otro fragmento es subducido bajo la placa continental Suramericana con bajo ángulo, lo que explicaría la ausencia de un arco magmático ya que la cuña mantélica se encontraría lejos de la zona de convergencia. Esta subducción plana propuesta ocurre desde el Mioceno con una vergencia sureste y a una velocidad de 2.1 mm/año.

Mora (2018) propone que el límite a nivel de corteza y manto entre la placa Caribe y Suramérica/Atlántico es el sistema de fallas Oca-El Pilar-San Sebastián, por medio de una zona de desgarre cerca de la Sierra Nevada de Santa Marta. El fragmento de la placa hacia el sur de la zona de desgarre está formada por tres segmentos con diferentes

inclinaciones: un segmento oeste plano somero, un segmento central más grueso de profundidad intermedia y un segmento este profundo muy inclinado; cada uno con propiedades de flotabilidad diferentes que explican los cambios de inclinación. Esta zona sur se está subduciendo desde el Eoceno (inferior-medio) debajo de la placa Suramericana.

La parte norte de la placa desgarrada ha sido interpretada por Flinch (2003) como una subducción bloqueada, es decir, luego de que un evento de obducción cesa y se bloquea (Cretácico Superior-Paleoceno), la subducción toma el relevo (del Paleoceno al Holoceno) y comienza un proceso de exhumación de la losa obducida. Sin embargo para Mantilla (2007), la parte superior de la corteza oceánica no fue obducida, sino desprendida durante la subducción (*Offscraping*) (Figura 2-1).

Figura 2-1: Diagrama esquemático de la configuración actual de la zona de estudio (Mantilla, 2007)



La subducción oblicua de la litosfera del Caribe creó el primer prisma de acreción en el borde de la placa continental (Suramérica) y condujo al desarrollo de la cuenca del paleoantearco en el noroeste de Colombia. Los materiales de la placa del Caribe superior desprendidos (basaltos, rocas ultramáficas y sedimentos pelágicos del Cretácico superior) y turbiditas continentales del Paleoceno Tardío al Eoceno Medio construyeron inicialmente el prisma. El basamento continental de la placa Suramericana actuó como un tope rígido para las unidades acumuladas (Mantilla, 2007).

La cuenca Sinú-San Jacinto es el resultado de dos episodios de acreción, deformación y levantamiento del Paleoceno al Oligoceno, el basamento de la cuenca es material oceánico sobre el cual se depositaron arcillas, calizas y chert de aguas profundas (Formación Cansona) durante el Coniaciano (Flinch, 2003).

El cinturón plegado Sinú-San Jacinto está caracterizado por estructuras anticlinales apretadas, empinadas y elongadas, separadas por sinclinales amplios. Las topografías elevadas coinciden con un máximo de deformación en contraste con el decrecimiento gradual de la deformación y la topografía más lejos de los núcleos de los anticlinorios. La historia tectónica de este terreno es una combinación de esfuerzos regionales debido a la placa convergente y diapirismo interno impulsado por la gravedad (Duque-caro, 1984).

Para Toussaint & Restrepo (2020), la zona de Sinú-San Jacinto pertenece al terreno Calima que a su vez hace parte de la Meseta (*"Plateau"*) del Caribe cuyo origen ha sido atribuido al paleo punto caliente Galápagos al sur de la posición actual. Desde la formación de la meseta hasta la ubicación actual ha habido acumulación de corteza oceánica hasta el borde continental norte de los Andes y el margen caribeño de América del sur.

3. Metodología

3.1 Muestreo

El pozo estratigráfico Las Lauras fue perforado y descrito por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en el 2015, está ubicado en la vereda Guarica, municipio de Planeta Rica, departamento de Córdoba. Este pozo alcanzó 2310,69 pies de profundidad y los núcleos se encuentran actualmente en la litoteca nacional del Servicio Geológico Colombiano. Hocol S.A. seleccionó 60 tramos del pozo para elaborar secciones delgadas pulidas las cuales son la base del presente estudio.

3.2 Petrografía y metalografía

A partir de la descripción macroscópica y la selección de los tramos representativos se realizaron 60 secciones delgadas las cuales fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia. Para este análisis la Universidad Nacional cuenta con microscopios de las marcas Zeiss Primotech, Olympus CX-31 y Olympus CX-41, con luz transmitida y reflejada. Este análisis permitió identificar características base de las interpretaciones de procesos geológicos y estructurales que no pudieron ser reconocidos en la descripción macro de la roca.

3.3 Espectroscopía Raman

Los análisis de Espectroscopía Raman se realizaron en un equipo InVia Raman microscopio, con dos tipos de láser, uno de 633 nm y otro de 532 nm, de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. El propósito de este análisis es poder diferenciar los polimorfos de serpentina así como las mezclas de fases entre las serpentinas, talcos y cloritas que petrográficamente no fue posible identificar.

3.4 Química mineral

Se realizaron análisis de microsonda electrónica en el equipo JEOL Superprobe JXA-8230 de la Universidad Nacional de Colombia, que cuenta con un espectrómetro dispersor de energía (EDS) con la habilidad de detectar de manera simultánea un rango amplio de elementos; tres espectrómetros dispersores de longitud de onda (WDS) que permiten mayor sensibilidad en el análisis composicional cuantitativo; y un detector de electrones secundarios. El cálculo del Fe^{+3} y el Fe^{+2} así como la clasificación composicional de los olivinos, piroxenos y espinelas se realizaron mediante la hoja de cálculo disponible en la página de internet <http://www.gabbrosoft.org>.

3.5 Geoquímica de roca total

Para este análisis fueron seleccionadas cuatro muestras que representan los diferentes tipos de roca y grados de alteración con sus respectivas fases minerales características. Las muestras enviadas para los análisis fueron testigos o contramuestras de las secciones delgadas, las cuales se trituraron hasta un tamaño menor a 2mm y se pulverizaron para posteriormente tamizarlas en malla de 75 micras con el fin de obtener 25 gramos de muestra homogénea. Para caracterizar el contenido de óxidos mayores, se empleó la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF), para los elementos traza y los elementos de tierras raras se utilizó un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) usando digestión por agua regia. Todo esto se realizó en los laboratorios de ALS Global Colombia.

4. Resultados

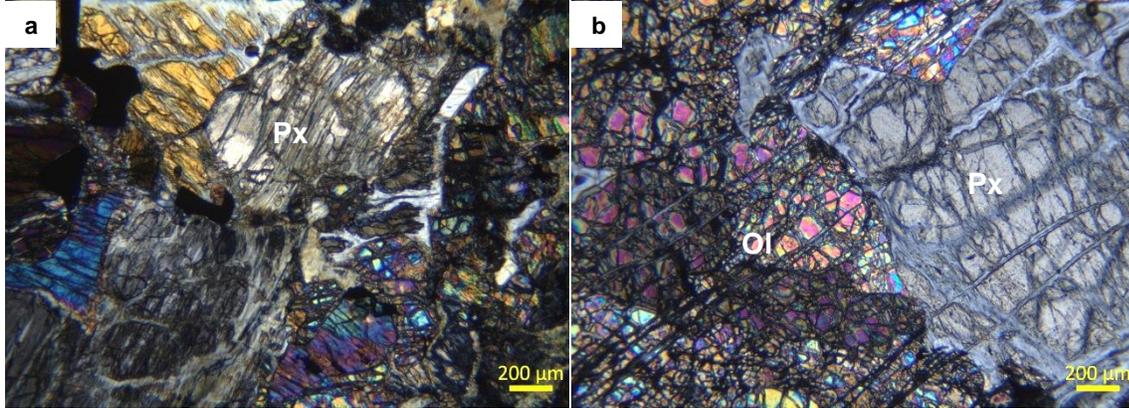
4.1 Petrografía

4.1.1 Peridotitas

Las rocas perforadas en el pozo Las Lauras corresponden a peridotitas tipo Iherzolitas a harzburgitas serpentinizadas con diferentes grados de alteración que van desde 60 a 100%. Teniendo en cuenta que la estructura general de todo el pozo es brechada, en algunas muestras se pueden encontrar xenolitos de peridotita con mínima alteración rodeadas por serpentinitas. Los minerales formadores de estas rocas son fundamentalmente olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno y espinelas, en orden de abundancia (Figura 4-1). El olivino se presenta en forma anhedral, de verde claro a incoloro, con colores de interferencia de finales del segundo orden; los cristales menos alterados presentan fracturamiento y remplazamiento a serpentina en los bordes y fracturas, formando una textura en malla. Los otros minerales formadores de las peridotitas son clinopiroxenos y ortopiroxenos, en ocasiones difíciles de diferenciar unos de otros. Los ortopiroxenos, se presentan de forma anhedral, extinción recta, exfoliación en una dirección, maclas ocasionales en la dirección de alargamiento así como exsolución de clinopiroxenos; ocasionalmente deformados. El clinopiroxeno se presenta con formas subhedrales a anhedrales, de color verde, rosa y pardo, extinción oblicua y algunos cristales muestran dos direcciones de exfoliación.

Figura 4-1: Relictos de minerales primarios de las peridotitas serpentinizadas en luz transmitida, XPL. (a) piroxeno alterándose a serpentina (muestra Las Lauras IX 715.25),

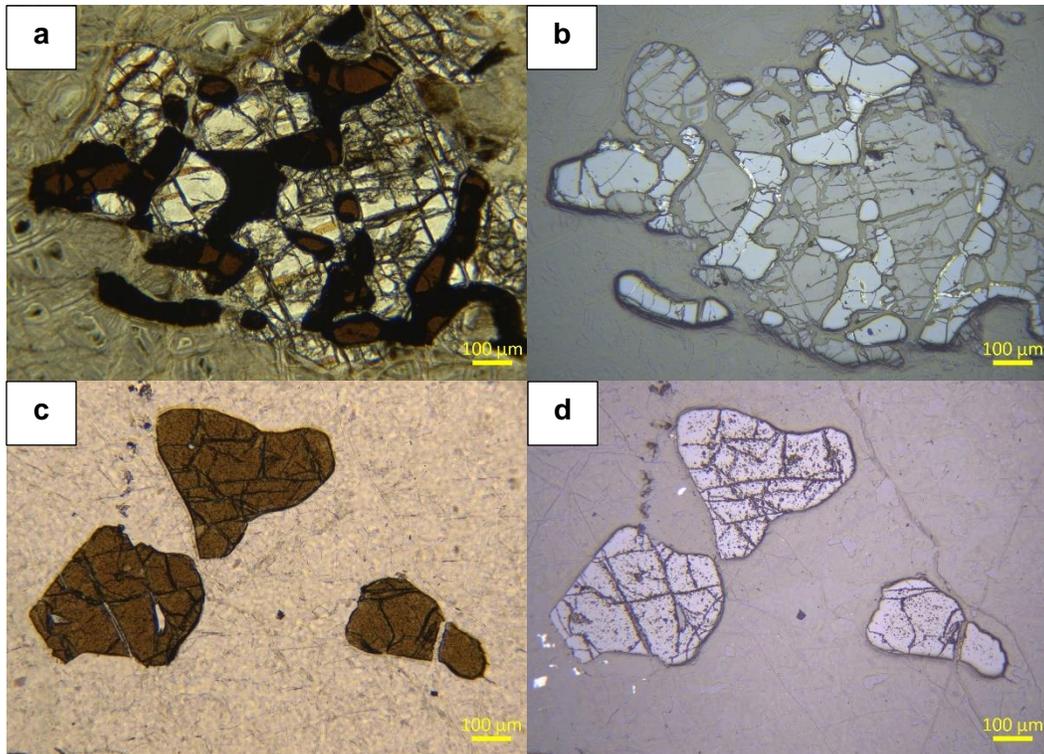
(b) olivino fracturado con bordes de serpentina y piroxeno alterándose a serpentina (muestra Las Lauras IX 916.91)¹.



Las espinelas son minerales semitraslúcidos, que se encuentran entre los cristales de olivinos y piroxenos presentando formas subhedrales y anhedrales con relieves moderados y altos, generalmente fracturadas (Figura 4-2).

Figura 4-2: Forma y disposición de las espinelas, a) muestra Las Lauras IX 1065.33, luz transmitida PPL, b) muestra Las Lauras IX 1065.33, Luz reflejada, c) muestra Las Lauras IX 2261.16, luz transmitida PPL y d) muestra Las Lauras IX 2261.16, luz reflejada

¹ El número al final del código Las Lauras IX corresponde a la profundidad donde se tomó la muestra en el pozo

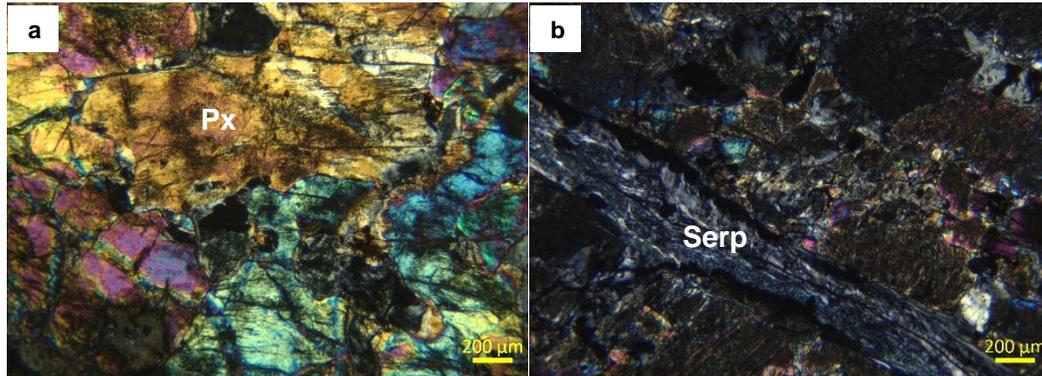


4.1.2 Piroxenitas

Intercalados con las peridotitas se encuentran piroxenitas cortadas por venas de serpentina. Estas rocas están compuestas por clinopiroxeno, ortopiroxeno y en menor proporción por olivino, el grado de serpentización en estas rocas es menor que en las peridotitas. Se presentan a lo largo del pozo en forma de pequeños lentes o fragmentos rodeados por venas de serpentina (

Figura 4-3).

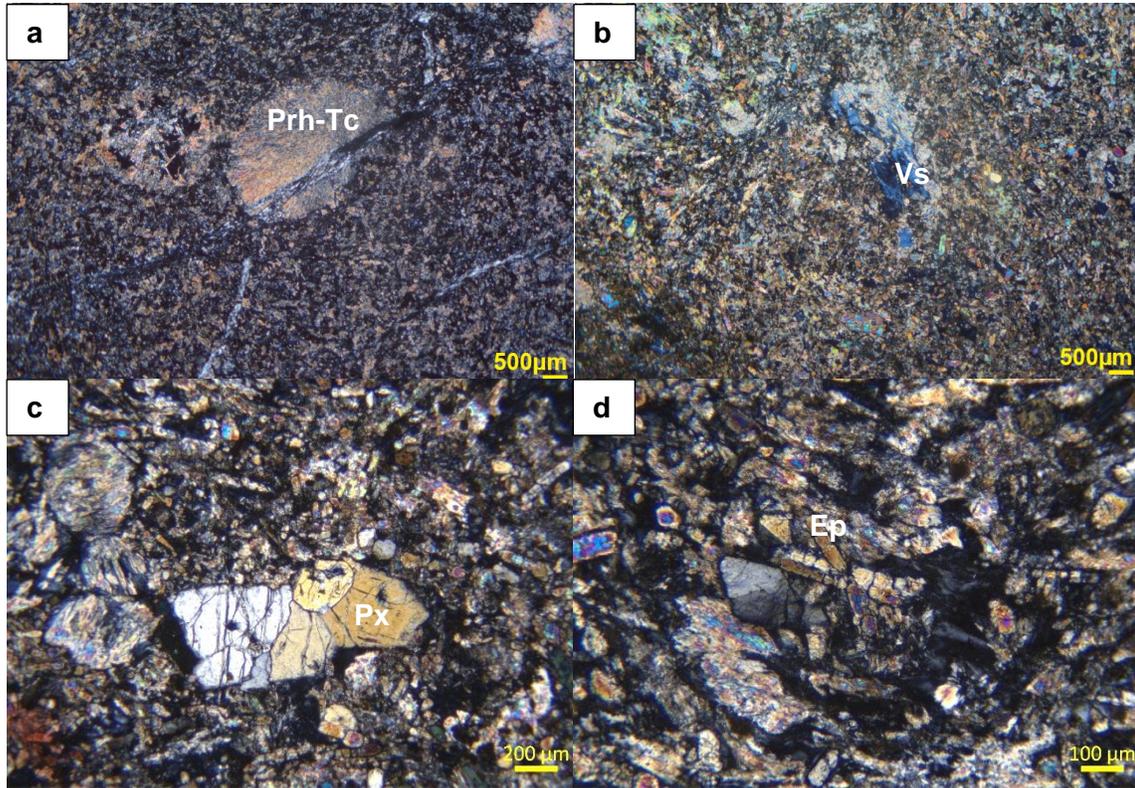
Figura 4-3: Piroxenitas cortadas por venas de serpentina, bajo luz transmitida XPL, en la muestra Las Lauras IX 1025.75, a) piroxenos, b) venas de serpentina



4.1.3 Rodingita

Estas rocas se presentan en la parte somera del pozo, en una sección de aproximadamente 1.8 metros donde se recuperaron rocas totalmente diferentes al resto. Macroscópicamente presentan una coloración blanca a gris que la diferencia de las rocas adyacentes y microscópicamente tienen una textura amigdalar, con fenocristales subhedrales de piroxenos y otros cristales anhedrales completamente alterados a prehnita y talco, en una matriz de epidota y vesuvianita. Estas rocas fueron clasificadas como rodingitas y están cortadas por venas de serpentina interconectada a interpenetrativa y se presenta en contacto neto con rocas peridotíticas serpentinizadas (Figura 4-4).

Figura 4-4: Fenocristales de prehnita-talco y piroxeno en una matriz de epidota y vesuvianita, bajo luz transmitida XPL, a y b) muestra Las Lauras IX 368.91, c y d) muestra Las Lauras IX 372.58



4.1.4 Alteración Hidrotermal

La alteración hidrotermal de las peridotitas debido a procesos de hidratación genera serpentización con diferentes grados de intensidad a lo largo de las rocas recuperadas del pozo. Los minerales principales de la alteración son serpentina, clorita, magnetita, pirita y en menor proporción talco, óxidos de hierro, sulfuros, clorita y kammererita.

Se evidenciaron dos procesos de alteración hidrotermal, representados por la textura pseudomorfa y la textura no pseudomorfa. La textura más representativa de las rocas es la textura pseudomorfa, que según la intensidad de la alteración genera diferentes formas y texturas en los minerales formadores.

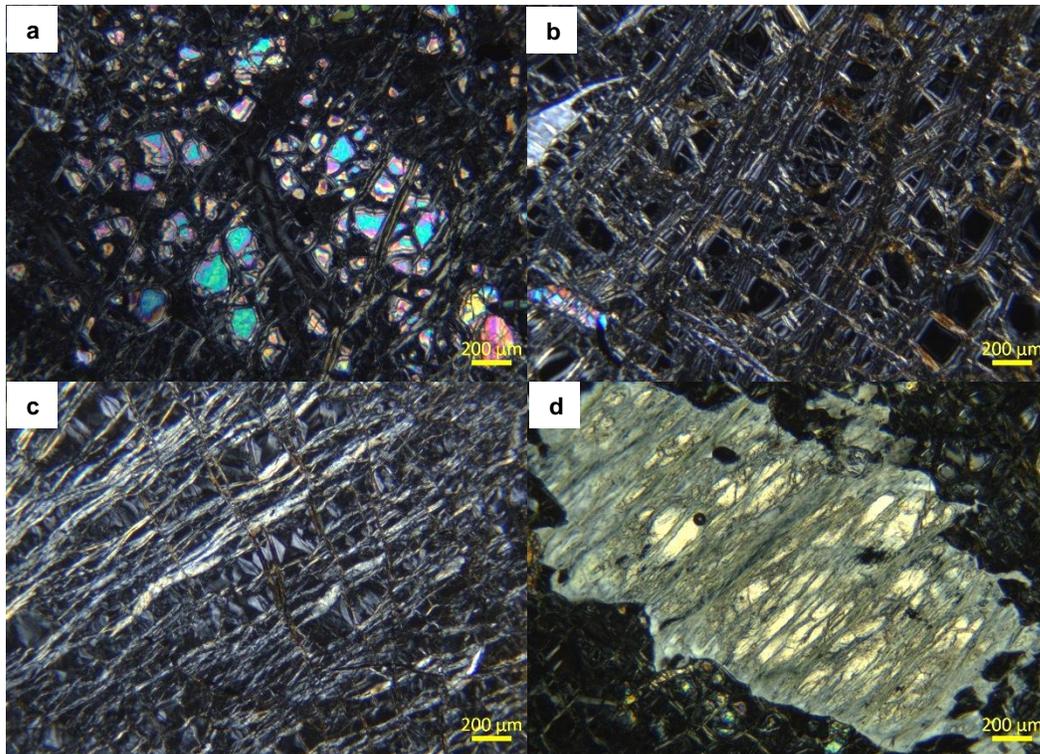
- **Textura pseudomorfa**

El olivino es más susceptible a alterarse en este proceso formando una textura de malla y reloj de arena. El proceso de alteración en el olivino inicia en sus fracturas y límites de grano formando una malla de serpentina con núcleos de olivino, y a medida que avanza la

alteración el núcleo de olivino se oxida o se vuelve isotrópico hasta formar una textura en forma de reloj de arena (Figura 4-5a-c).

En cuanto a los piroxenos, los ortopiroxenos son más susceptibles de alterarse a serpentina que los clinopiroxenos. La alteración en los ortopiroxenos forma una textura bastítica, en la cual el cristal de ortopiroxeno comienza a alterarse en sus bordes y siguiendo los planos de clivaje (Figura 4-5d), gradualmente pasa a un pseudomorfo de ortopiroxeno totalmente remplazado por serpentina. La alteración hidrotermal del clinopiroxeno en la textura pseudomorfa genera acumulaciones ocasionales de magnetita en planos de clivaje o fractura y en los bordes del cristal.

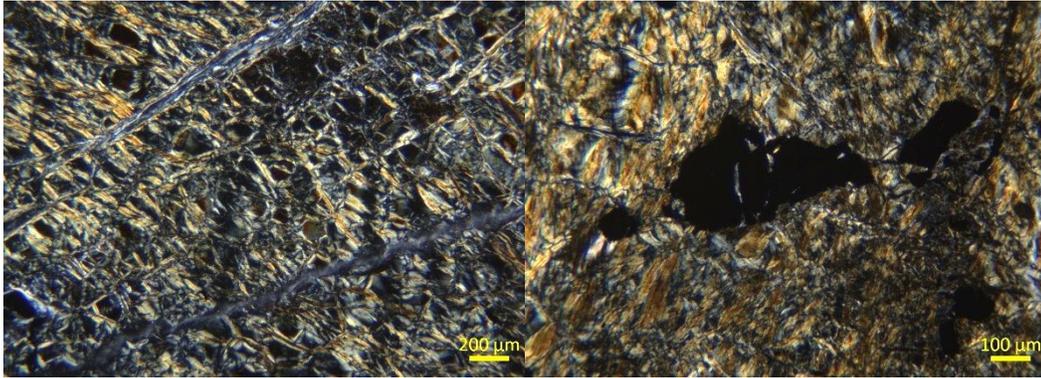
Figura 4-5: Textura pseudomorfa, bajo luz transmitida, XPL, a) muestra Las Lauras IX 1417, b) muestra Las Lauras IX 873.16, c) muestra Las Lauras IX 2142.75, d) muestra Las Lauras IX 2264



Se observó en algunas muestras una nueva generación de serpentina pseudomorfa con textura en malla interpretada como posterior al primer evento de alteración pseudomorfa por su apariencia sobrepuesta a la primera serpentinización. Este

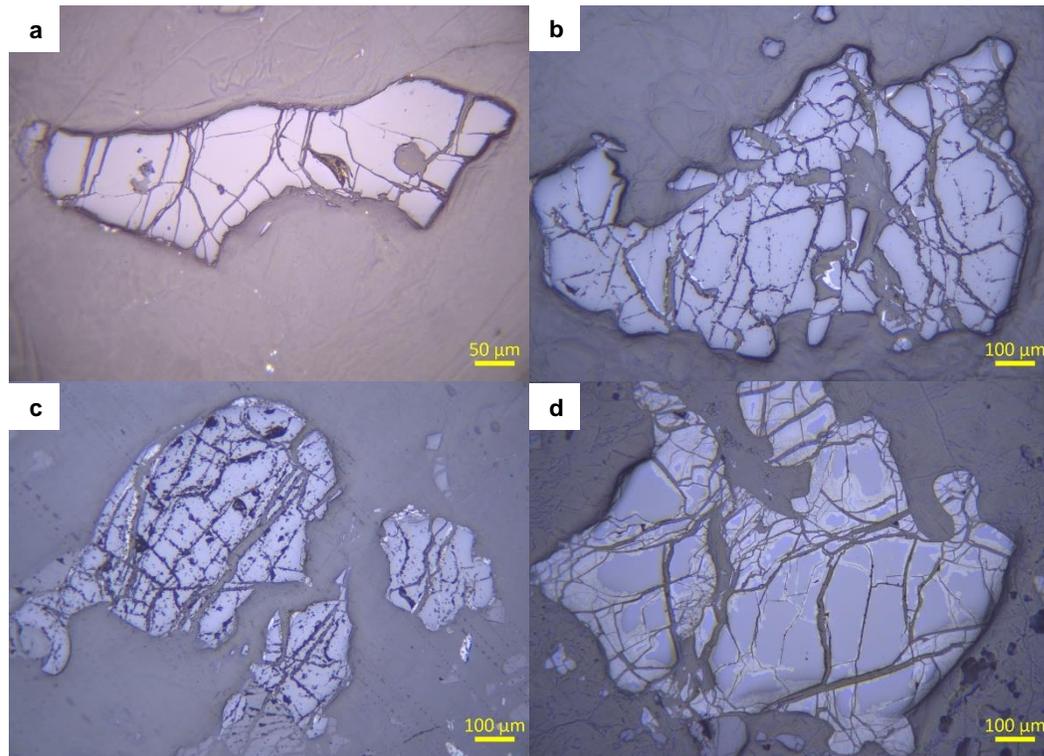
segundo evento muestra una orientación preferencial y una serpentina más gruesa y oxidada con núcleos mucho más pequeños (Figura 4-6).

Figura 4-6: Malla de serpentina sobreimpuesta. Luz transmitida, XPL, muestra Las Lauras IX 2068.91.



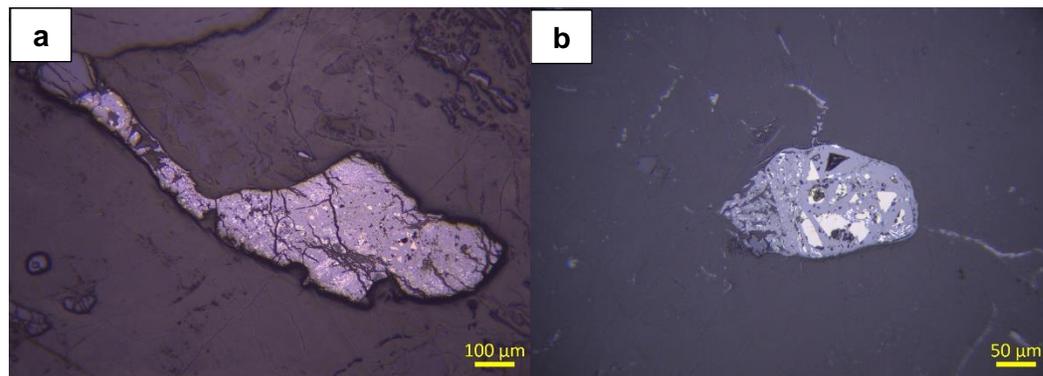
La alteración pseudomorfa genera también diferentes texturas en las espinelas, esta alteración se inicia al igual que en los olivinos desde las fracturas y bordes de los cristales. La forma de las espinelas cambia a medida que aumenta el grado de alteración formando texturas no porosas (Figura 4-7a), medianamente porosas con enriquecimiento en hierro (Figura 4-7b), muy porosas (Figura 4-7c) y zonadas (Figura 4-7d).

Figura 4-7: Texturas de alteración en las espinelas bajo luz reflejada, a) muestra Las Lauras IX 2261.16, b) muestra Las Lauras IX 283.5, c) muestra Las Lauras IX 715.25, d) muestra Las Lauras IX 883.66



En forma diseminada y en cristales anhedrales muy pequeños se encuentran sulfuros intercrecidos con óxidos de hierro. Esta precipitación de sulfuros se da en las peridotitas alteradas a serpentina pseudomorfa y de manera previa a las venas (Figura 4-8).

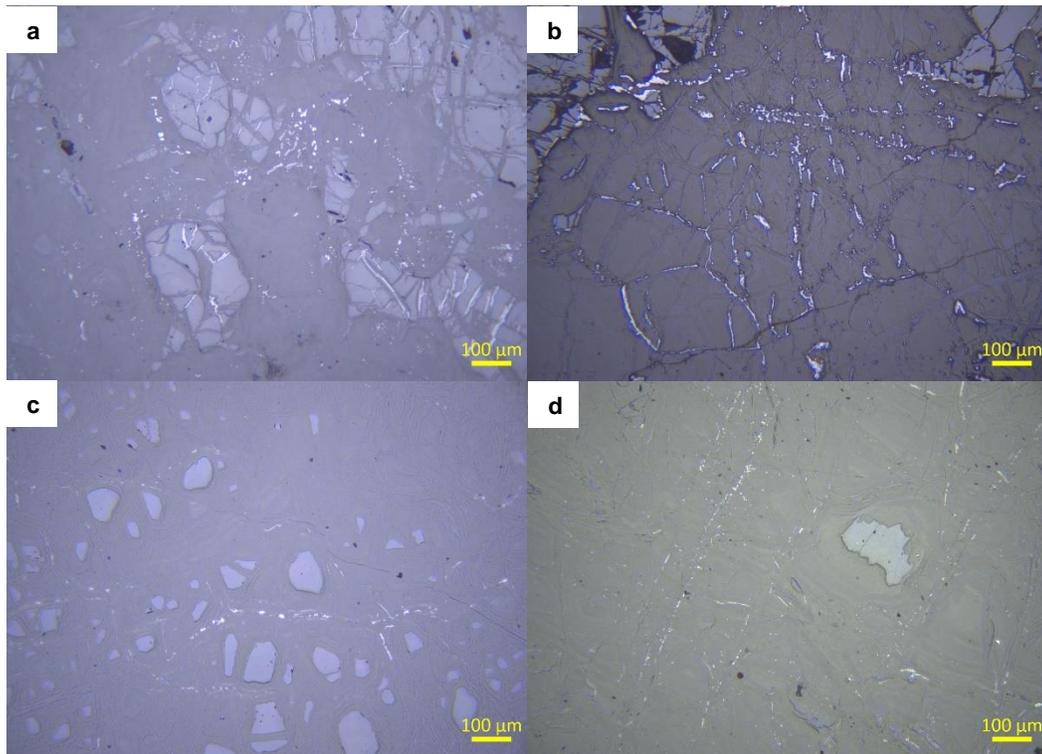
Figura 4-8: Sulfuros diseminados, en luz reflejada, a) muestra Las Lauras IX 1566.41, b) muestra Las Lauras IX 1417



La magnetita está presente desde el inicio de la alteración pero su forma y distribución van cambiando a medida que avanza el frente de alteración. Inicialmente se forma en las fracturas y bordes de olivinos y algunos piroxenos (Figura 4-9a), a medida que aumenta el

grado de alteración se forman agregados granulares finos orientados en la dirección de la malla de serpentina (Figura 4-9b-d) y en los bordes y fracturas de las espinelas.

Figura 4-9: Ocurrencia de magnetita (mineral más reflectante) en la textura pseudomorfa bajo luz reflejada, a) muestra Las Lauras IX 756.41, b) muestra Las Lauras IX 1282.33, c) muestra Las Lauras IX 2164.33, d) muestra Las Lauras IX 2264



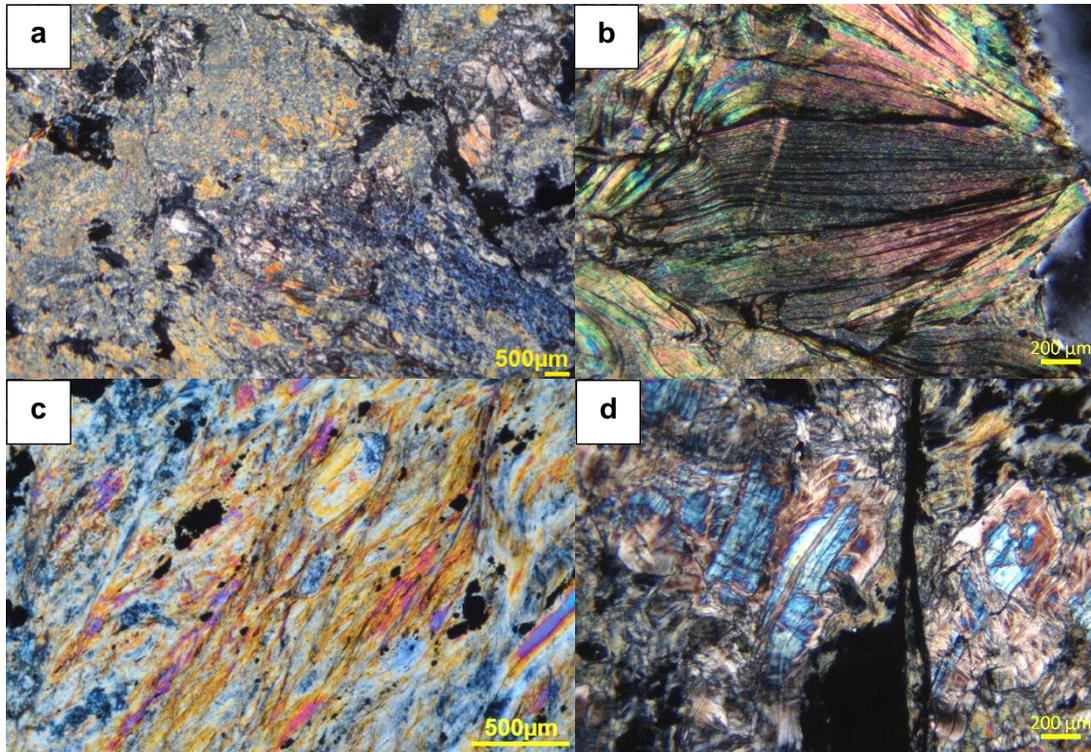
- **Textura no pseudomorfa**

La textura no pseudomorfa fue identificada en las partes profundas del pozo donde las peridotitas tienen un porcentaje de alteración del 100% y en forma de venas a lo largo de casi todas las muestras. La serpentina no pseudomorfa se desarrolla superpuesta a la serpentización pseudomorfa y también sobre relictos de minerales formadores. Los principales minerales que acompañan a las serpentinas no pseudomorfas son cloritas, talcos y magnetita.

La textura no pseudomorfa tiene una estructura foliada, donde predomina la serpentina interconectada y en menor proporción zonas de serpentina interpenetrativa. Estas texturas de las serpentinas están intercrecidas con talcos, cloritas y magnetitas (Figura 4-10).

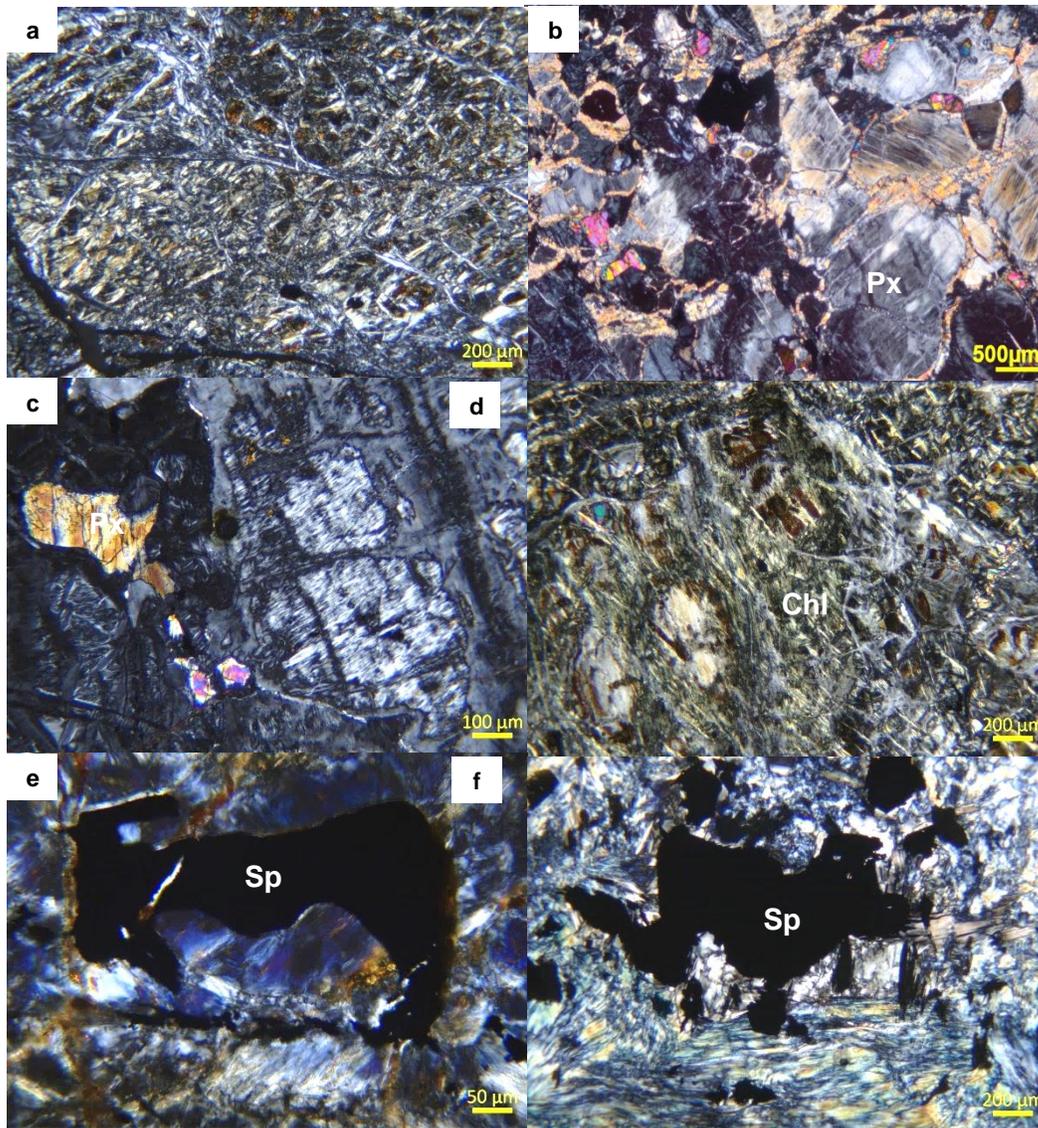
Figura 4-10: Serpentización no pseudomorfa en luz transmitida XPL (a), intercrecida con cloritas, muestra Las Lauras IX 1712.33 (b), talco, muestra Las Lauras IX 1712.33, c)

magnetita (opaco), muestra Las Lauras IX 2068.91, d) kammererita, muestra Las Lauras IX 1712.33



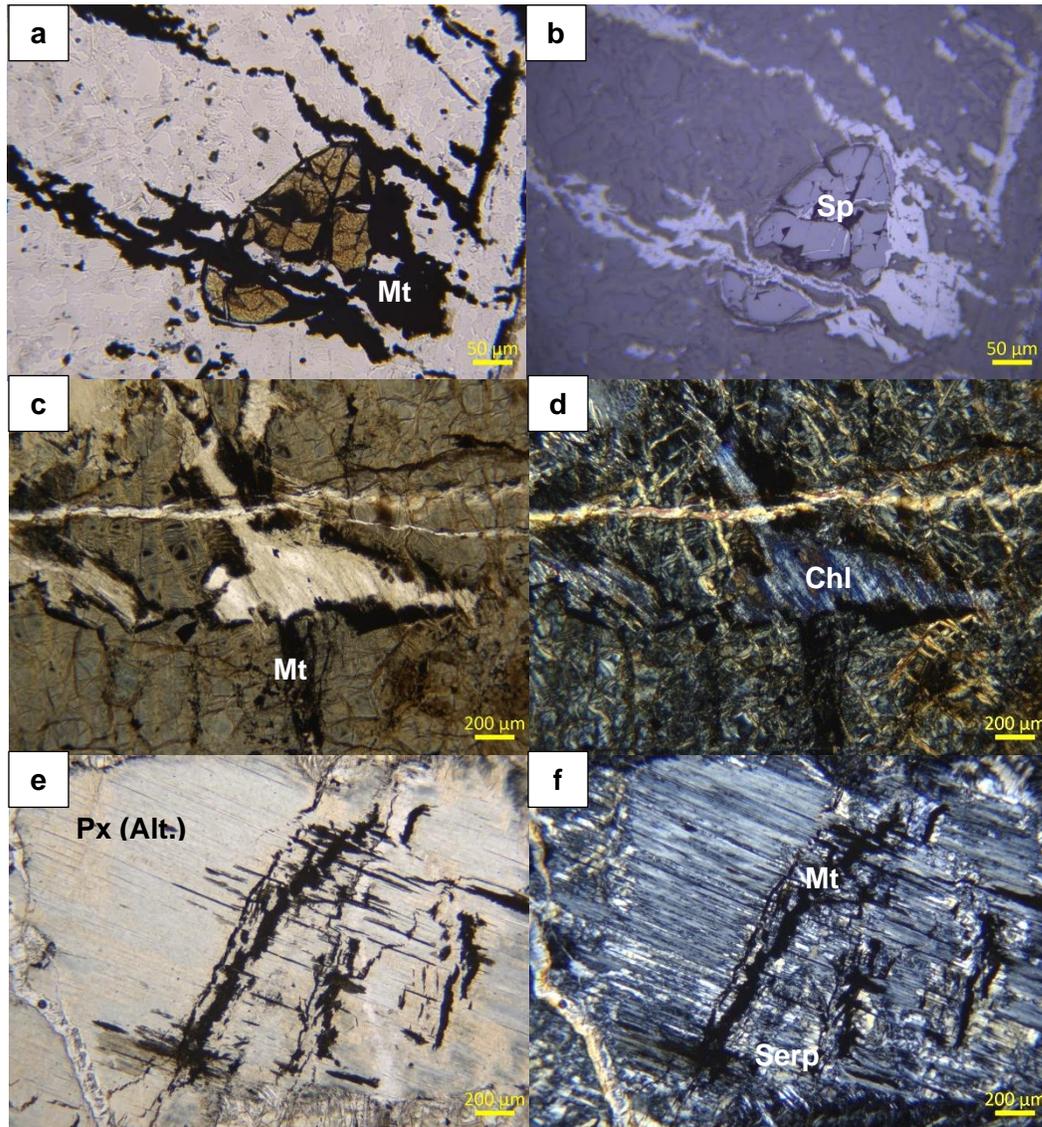
La serpentización no pseudomorfa está presente a lo largo del pozo en forma de venas y en las rocas más proximales en forma de brechas (Figura 4-11a). El resultado de la serpentización no pseudomorfa incipiente en los piroxenos genera una textura en corona (Figura 4-11b), así como una especie de malla de clorita y serpentina en las direcciones del clivaje (Figura 4-11d) y una textura interconectada e interpenetrativa en las bastitas (Figura 4-11c, d). En cuanto a las espinelas, se forma una textura en corona compuesta por cloritas (Figura 4-11e, f).

Figura 4-11: texturas y formas de la serpentización no pseudomorfa en luz transmitida XPL, a) muestra Las Lauras IX 601.5, b) muestra Las Lauras IX 777.58, c) muestra Las Lauras IX 916.91, d) muestra Las Lauras IX 529.75, e) muestra Las Lauras IX 777.58, f) muestra Las Lauras IX 1925.75



La magnetita tiende a enriquecerse y a reorientarse cuando está presente la serpentina no pseudomorfa, sobre todo en las peridotitas con mayor porcentaje de alteración (Figura 4-12).

Figura 4-12: Magnetita en el proceso de alteración no pseudomorfa, a) luz transmitida PPL, muestra Las Lauras IX 1796, b) luz reflejada, muestra Las Lauras IX 1796 c y d) luz transmitida PPL y XPL, muestra Las Lauras IX 1257.25, e y f) luz transmitida PPL y XPL, muestra Las Lauras IX 777.58



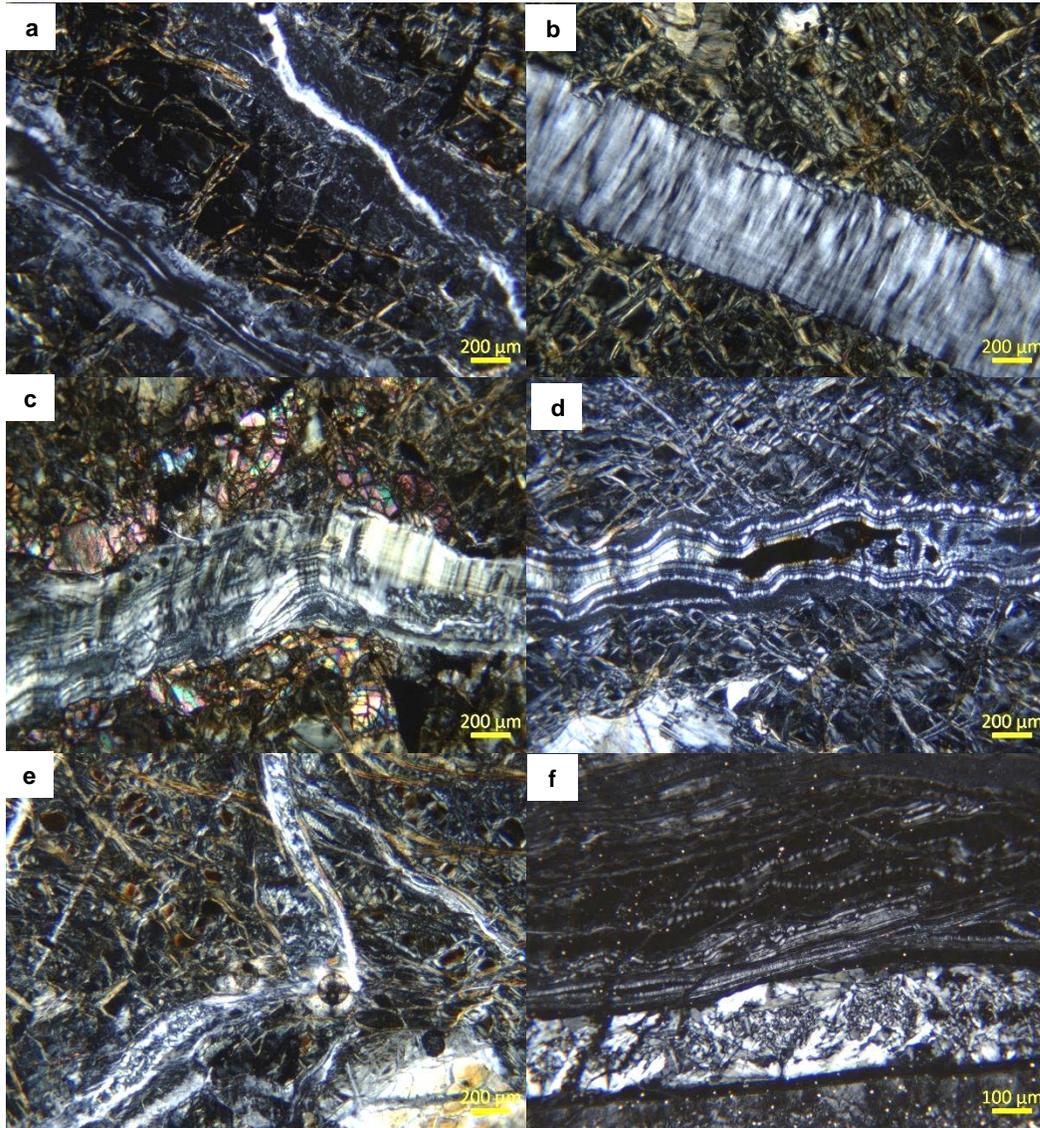
- **Venas de Serpentina**

El proceso de hidratación de las peridotitas sumado con la tectónica, permiten la formación y precipitación de serpentina en venas, formadas a partir de la serpentina preexistente o de los minerales formadores que se están consumiendo en el proceso. De este modo, se diferenciaron cuatro tipos de venas de serpentina con sus características texturales propias. Las venas tipo 1 son venas de serpentina casi isotrópicas, que adicionalmente generan un halo de alteración en los bordes de la vena (Figura 4-13a). Las venas tipo 2, las más abundantes a lo largo del pozo, consisten en fibras de serpentina paralelas unas a otras y perpendiculares a la dirección de propagación de la vena (Figura 4-13b). Las

venas tipo 3 son las que presentan mayor variedad de texturas y están compuestas por bandas paralelas de serpentina fibrosa con talco o clorita (Figura 4-13c) y por bandas tipo “*crack-seal*” (Figura 4-13d). Las venas tipo 4 aunque también presentan variedad de texturas, se diferencian de las tipo 3 porque los minerales de serpentina tienden a crecer desde las paredes hacia el centro de la vena (Figura 4-13e, f).

En la mayoría de muestras se puede diferenciar claramente por lo menos un tipo de vena, en muchas otras las venas se entrecortan unas a otras o aprovechan los planos de debilidad ya creados por las venas anteriores, para precipitar formando tipos mezclados de venas.

Figura 4-13: Tipos y texturas en venas de serpentina, luz transmitida XPL, a) muestra Las Lauras IX 715.25, b) muestra Las Lauras IX 1114.83, c) muestra Las Lauras IX 1282.33, d) muestra Las Lauras IX 1925.75, e) muestra Las Lauras IX 647.33, f) muestra Las Lauras IX 2261.16



4.2 Espectroscopía Raman

Se realizaron análisis Raman en las serpentinas en malla, en los pseudomorfos de piroxeno alterados a serpentinas, serpentinas interconectadas-interpenetrativas, a los minerales opacos y a los diferentes tipos de venas de serpentina mencionados en el subcapítulo 4.1.4. Los espectros en su mayoría muestran mezcla de fases entre los polimorfos de serpentina o entre las serpentinas, cloritas y talco.

La malla de borde de serpentina en la textura pseudomorfa está compuesta en la parte más central por crisotilo (Figura 4-14a) y en las partes externas solo por lizardita (Figura 4-14b).

El centro de la malla tanto el reloj de arena, como el isotrópico están compuestos por crisotilo+lizardita. Las bastitas que se forman a partir de los piroxenos son crisotilos (Figura 4-15a) y el piroxeno es enstatita. Los pseudomorfos de piroxeno que se encuentran entre la textura en malla están compuestos por lizardita. Algunos de estos pseudomorfos presentan una textura en corona compuesta por antigorita (Figura 4-15b).

Figura 4-14: Espectros Raman de la malla de serpentina en la muestra Las Lauras IX 1114.83. a) parte central de la malla de serpentina compuesta por crisotilo, b) parte más externa de la malla de serpentina compuesta por lizardita

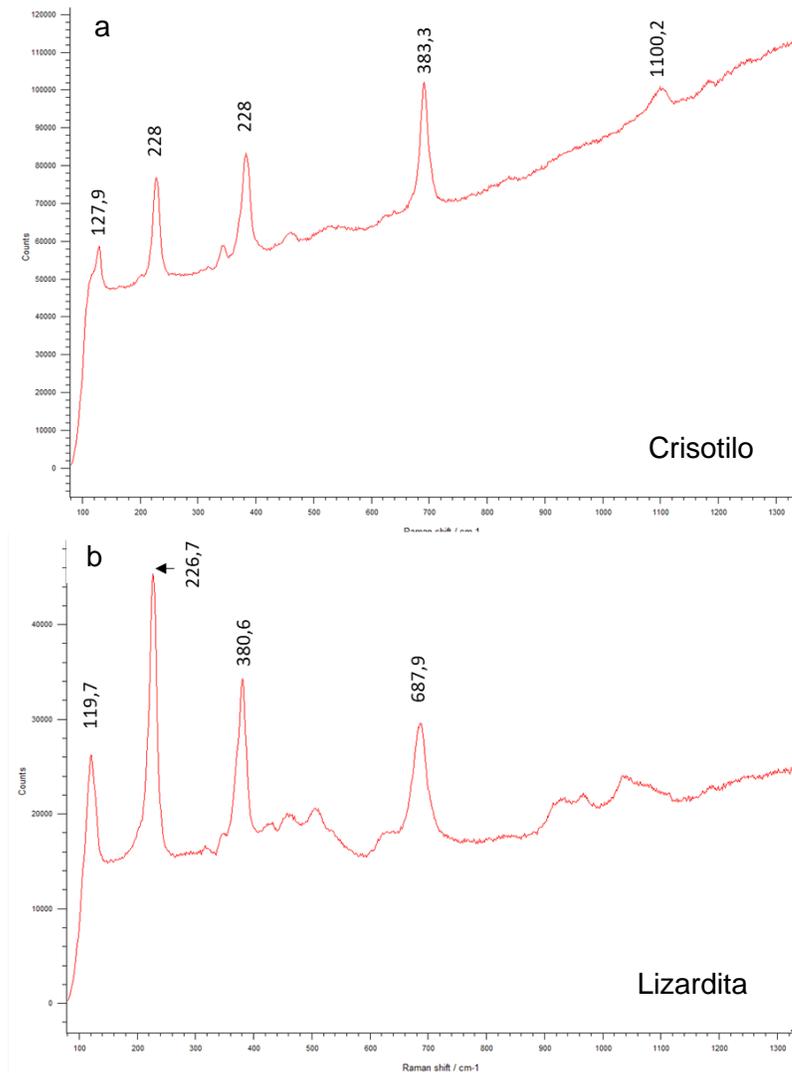
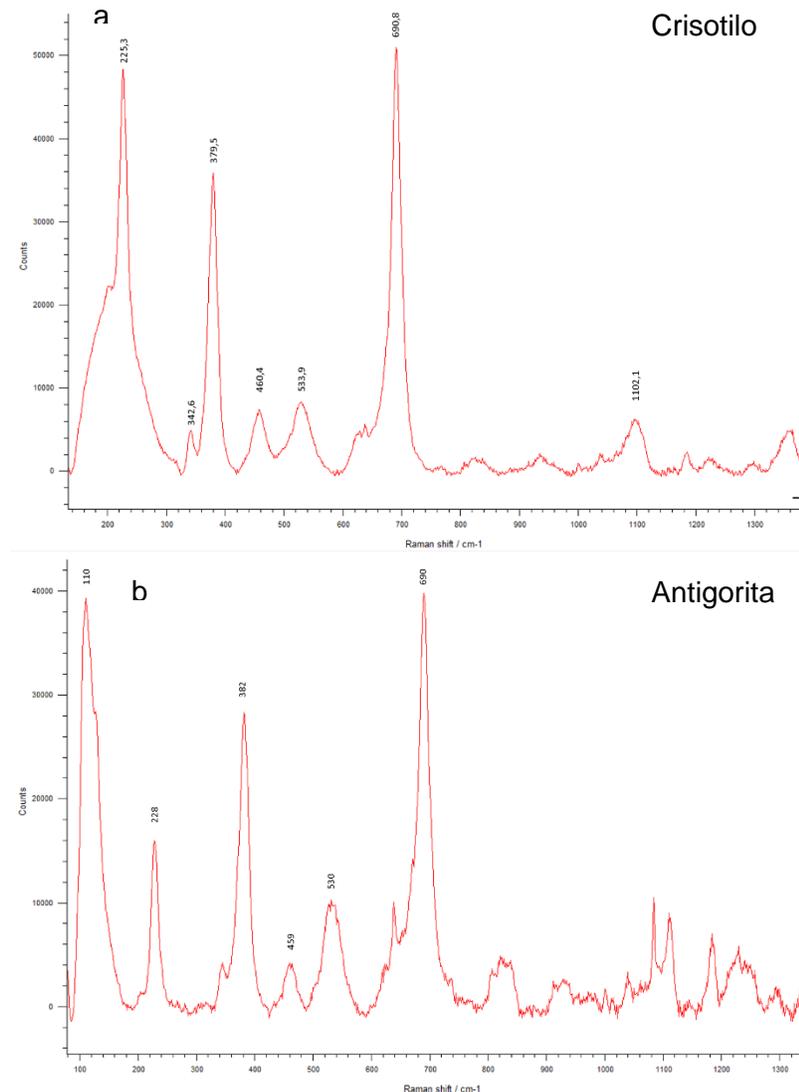
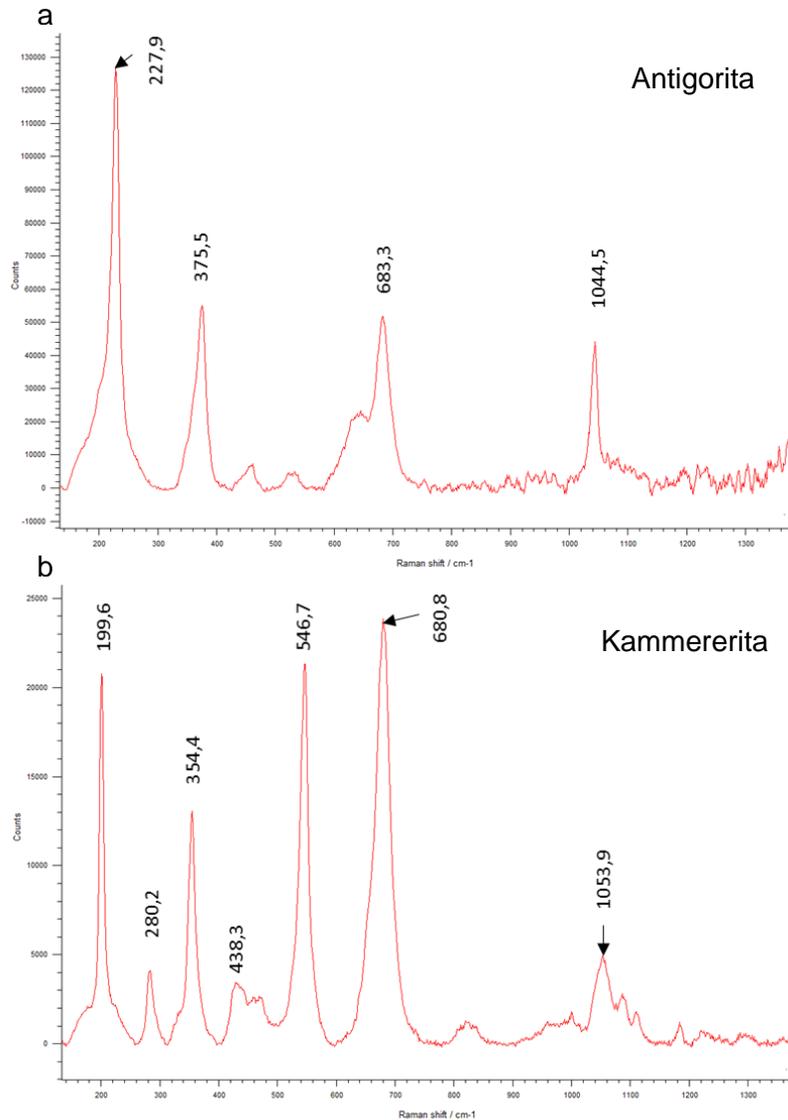


Figura 4-15: Espectros Raman de la alteración en los piroxenos. a) bastitas en enstatitas compuestas por crisotilo en la muestra Las Lauras IX 1925.75, b) corona de alteración en los piroxenos compuesta por antigorita en la muestra Las Lauras IX 777.58



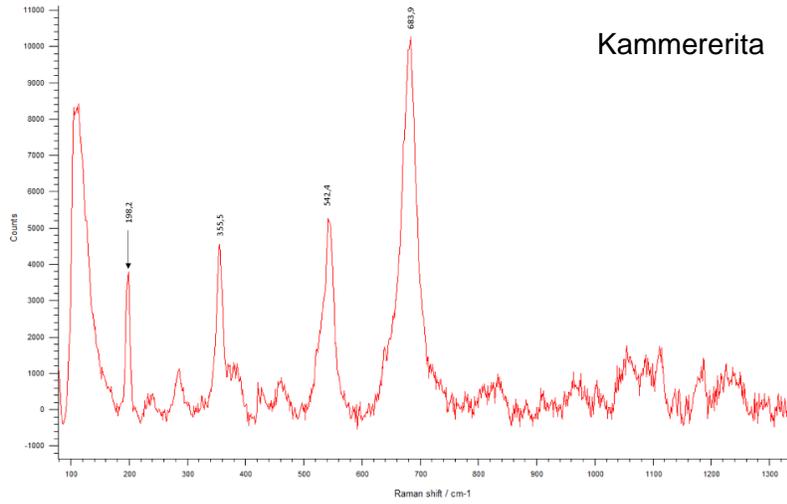
Las serpentin interconectadas e interpenetrativas de la textura no pseudomorfa están compuestas por antigorita y antigorita+clorita (Figura 4-16a). Los piroxenos que no fueron alterados a serpentina inicialmente, en la segunda hidratación fueron alterados a kammererita o clinocloro rico en cromo (Figura 4-16b).

Figura 4-16: Espectros Raman de la textura no pseudomorfa en la muestra Las Lauras IX 1712.33. a) serpentina interconectada-interpenetrativa compuesta por antigorita, b) clinopiroxenos alterados a kammererita



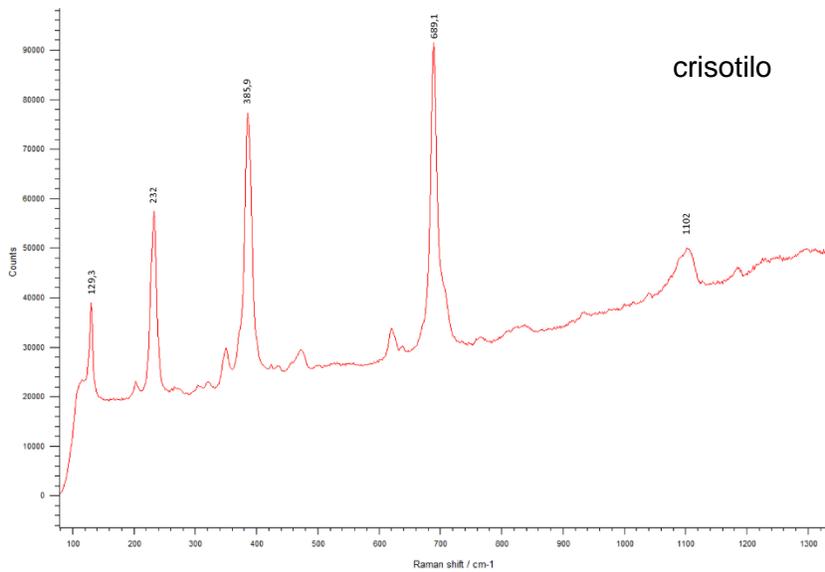
Las coronas que se forman en las espinelas durante la segunda hidratación están compuestas en la parte más proximal a la espinela, por kammererita (Figura 4-17), en la parte central por clorita+montmorillonita y en la parte más externa por crisotilo+antigorita.

Figura 4-17: Espectro Raman del mineral de alteración más proximal en la textura en corona de la espinela en la muestra Las Lauras IX 777.58



Las venas tipo 2 están compuestas por crisotilo (Figura 4-18), las venas tipo 3 son lizarditas y lizarditas+talco. y finalmente las venas tipo 4 están compuestas por lizardita+antigorita.

Figura 4-18: espectro Raman de la vena tipo 2 en la muestra Las Lauras 1114.83



Las venas de serpentina que cortan las piroxenitas están compuestas por bandas de antigorita en los bordes y lizardita+clorita en el centro.

4.3 Química mineral

4.3.1 Grupo de la espinela

Las espinelas hacen parte de los minerales formadores de las peridotitas serpentinizadas estudiadas, así como el olivino y el piroxeno pero en menor proporción que éstos, los resultados de los análisis se muestran en la Tabla 4-1. Las formas más comunes de las espinelas son anhedrales y muy fracturadas, las texturas más comunes que presentan son: porosas, zonadas, no porosas y con corona de clorita (Figura 4-7 y Figura 4-11e, f), incluso pueden encontrarse texturas combinadas (Tabla 4-2).

Tabla 4-1: Resultados promedio de los análisis EPMA en las espinelas

	Las Lauras IX 647.33		Las Lauras IX 777.58		Las Lauras IX 822.16		Las Lauras IX 1065.33		Las Lauras IX 1340.5			
	Centro		Borde		Centro		Centro		Centro			
	n=4	σ	n=1	n=1	n=1	n=4	σ	n=1	n=2	σ	n=2	σ
SiO ₂	0,02	0,00	4,50	9,60	8,49	0,02	0,01	0,00	0,15	0,18	0,01	0,00
Al ₂ O ₃	39,94	0,76	2,42	2,68	2,83	37,73	1,04	36,54	36,40	1,17	36,37	2,18
MgO	16,79	0,23	6,37	12,73	11,09	15,98	0,08	16,31	16,45	0,19	16,19	0,53
TiO ₂	0,03	0,00	0,08	0,31	0,34	0,03	0,01	0,03	0,04	0,00	0,03	0,00
ZnO	0,18	0,01	0,45	0,24	0,23	0,18	0,01	0,17	0,14	0,01	0,17	0,01
CaO	0,00	0,00	0,44	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CoO	0,03	0,01	0,00	0,05	0,04	0,05	0,01	0,03	0,03	0,01	0,04	0,00
V ₂ O ₃	0,17	0,01	0,09	0,24	0,25	0,18	0,03	0,17	0,18	0,03	0,18	0,02
NiO	0,20	0,01	0,09	0,12	0,12	0,18	0,01	0,19	0,20	0,00	0,19	0,00
FeO	14,63	0,26	52,17	36,71	37,57	15,56	0,15	15,54	14,74	0,09	15,53	0,23
MnO	0,17	0,00	2,27	0,74	0,73	0,17	0,01	0,17	0,17	0,00	0,18	0,01
Cr ₂ O ₃	26,18	0,60	22,02	26,56	26,82	27,17	0,94	28,99	29,21	0,38	28,58	1,58
Total	98,32	0,97	90,90	90,05	88,54	97,18	0,21	98,16	97,70	1,65	97,46	0,89

	Las Lauras IX 1454.16		Las Lauras IX 1649.08	Las Lauras IX 1925.75			Las Lauras IX 1949.41		Las Lauras IX 2261.61		
	Borde	Centro	Centro	Centro	Centro		Centro	Borde	Centro	Centro	
	n=1	n=1	n=1	n=1	n=2	σ	n=2	σ	n=1	n=1	n=1
SiO ₂	33,38	32,51	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	1,86	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,63	0,63	37,42	38,38	35,77	0,05	42,17	0,27	0,99	36,47	37,28
MgO	12,52	11,45	15,99	16,16	12,93	0,28	16,96	0,02	8,34	14,73	14,95
TiO ₂	0,02	0,01	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03	0,00	0,05	0,05	0,04
ZnO	0,01	0,01	0,19	0,16	0,44	0,21	0,20	0,06	0,18	0,18	0,18
CaO	23,74	22,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00
CoO	0,01	0,00	0,05	0,06	0,06	0,02	0,04	0,01	0,02	0,06	0,06
V ₂ O ₃	0,05	0,02	0,15	0,17	0,14	0,02	0,16	0,01	0,07	0,23	0,23
NiO	0,00	0,03	0,18	0,18	0,23	0,02	0,16	0,04	0,24	0,17	0,18
FeO	19,26	19,09	14,90	15,22	19,98	0,00	13,67	1,59	38,31	17,22	17,19
MnO	0,02	0,02	0,17	0,17	0,19	0,00	0,14	0,04	1,92	0,18	0,17
Cr ₂ O ₃	1,22	0,76	27,57	27,70	27,77	0,92	22,51	2,29	19,00	28,88	28,06
Total	90,85	87,09	96,00	98,00	97,47	0,75	95,68	3,28	71,22	98,00	98,00

La clasificación de cada espinela analizada, se basó en sus proporciones atómicas (#Cr, #Mg y #Al, Colás, 2015). La mayoría de las espinelas presenta zonación desde el centro del cristal hacia los bordes, es decir en el centro del cristal son espinelas *sensu stricto*, pero hacia los bordes son magnetita o magnesioferrita (Tabla 4-2).

Tabla 4-2: Caracterización de las espinelas

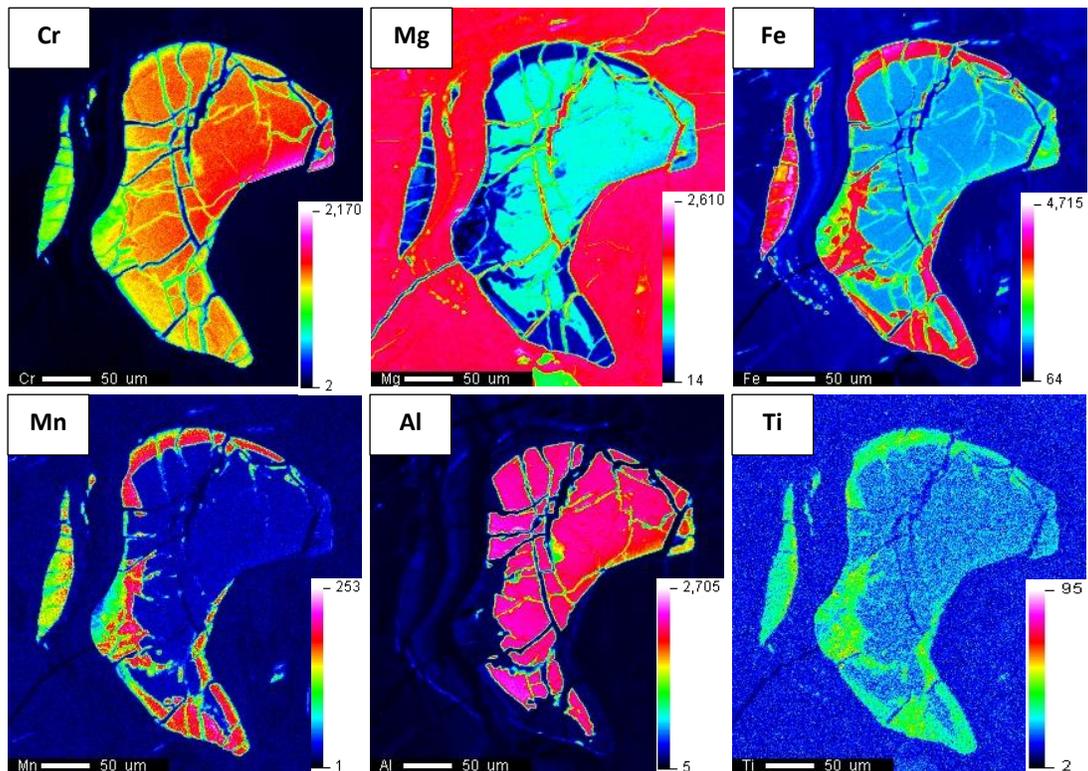
Muestra	Textura de alteración				Zona de análisis	Composición	Variaciones químicas			
	No porosa	Porosa	Zonada	Corona			#Cr	#Mg	#Al	Fe ³ /(Fe ³ +Fe ²)

Las Lauras IX			Centro	Espinela	0,30	0,72	0,95	0,19
647.33	x		Borde	Magnetita	0,86	0,33	0,10	0,56
Las Lauras IX			Centro	Magnesioferrita	0,87	0,51	0,20	0,41
777.58		x	Borde	Magnetita	0,86	0,47	0,21	0,40
Las Lauras IX	x		Centro	Espinela	0,31	0,69	0,95	0,19
822.16		x						
Las Lauras IX	x		Centro	Espinela	0,35	0,71	0,94	0,23
873.16		x						
Las Lauras IX	x		Centro	Espinela	0,35	0,71	0,95	0,19
1065.33		x						
Las Lauras IX	x		Centro	Espinela	0,33	0,71	0,94	0,23
1340.50		x						
Las Lauras IX			Borde	Magnesioferrita	0,57	0,54	1,00	0,00
1454.16		x	Centro	Espinela	0,45	0,52	1,00	0,00
Las Lauras IX	x		centro	Espinela	0,33	0,70	0,95	0,19
1649.08		x						
Las Lauras IX		x	centro	Espinela	0,35	0,58	0,94	0,17
1925.75	x		centro	Espinela	0,33	0,70	0,95	0,18
		x	centro	Espinela	0,28	0,72	0,95	0,19
Las Lauras IX			Centro	Espinela	0,25	0,74	0,97	0,17
1949.41	x		Borde	Magnesioferrita	0,93	0,58	0,05	0,72
		x	Centro	Espinela	0,35	0,65	0,95	0,16

Las Lauras IX 2261.16	x	Centro	Espinela	0,34	0,65	0,95	0,17
--------------------------	---	--------	----------	------	------	------	------

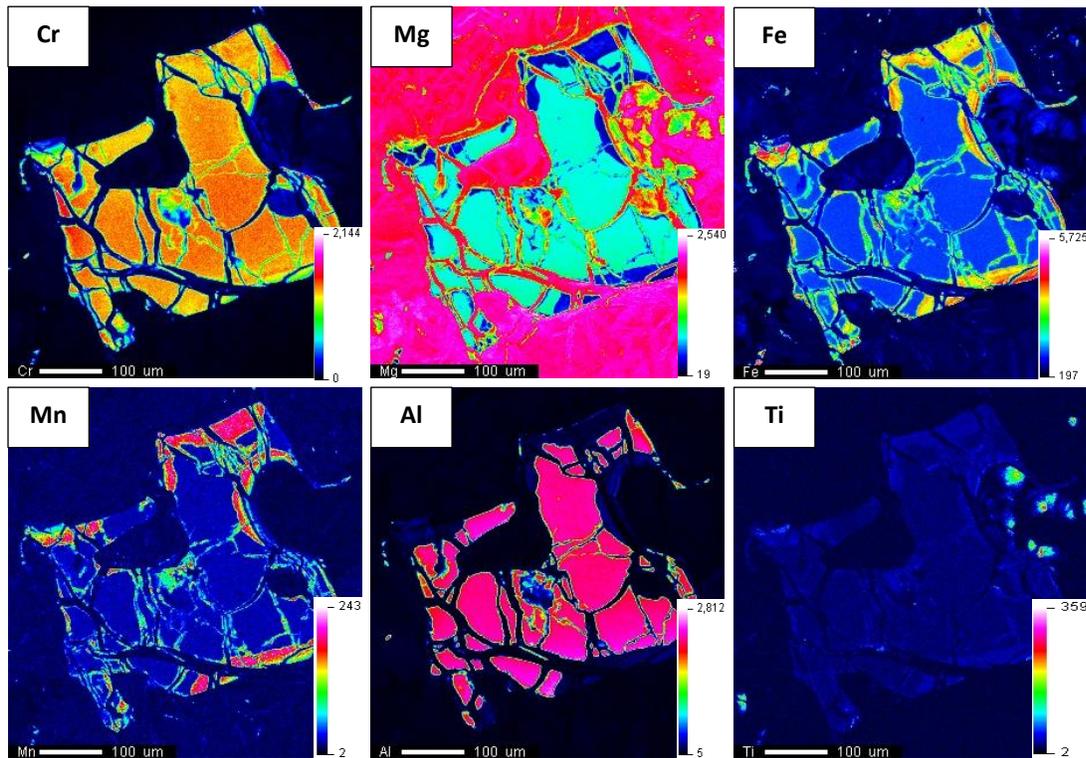
Las espinelas zonadas que no son porosas, presentan valores medios a altos en cromo hacia el centro del mineral, enriquecimientos de hierro y manganeso hacia los bordes, valores medios a bajos de titanio hacia los bordes y empobrecimientos de magnesio y aluminio hacia los bordes (Figura 4-19).

Figura 4-19: Mapas composicionales de espinelas no porosas con borde de magnetita, muestra Las Lauras IX 647.33



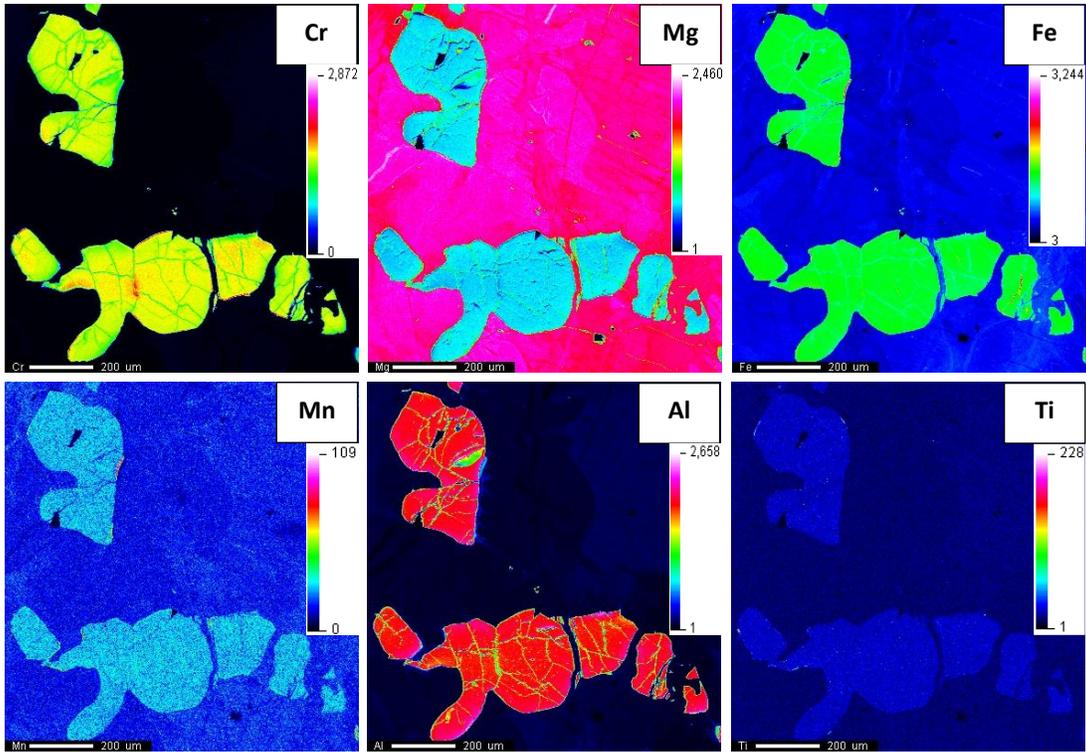
Las espinelas zonadas de borde poroso presentan las mismas características químicas de las zonadas no porosas, con la diferencia que los bordes presentan bajos contenidos de titanio (Figura 4-20).

Figura 4-20: Mapas composicionales de las espinelas porosas zonadas, muestra Las Lauras IX 1949.41



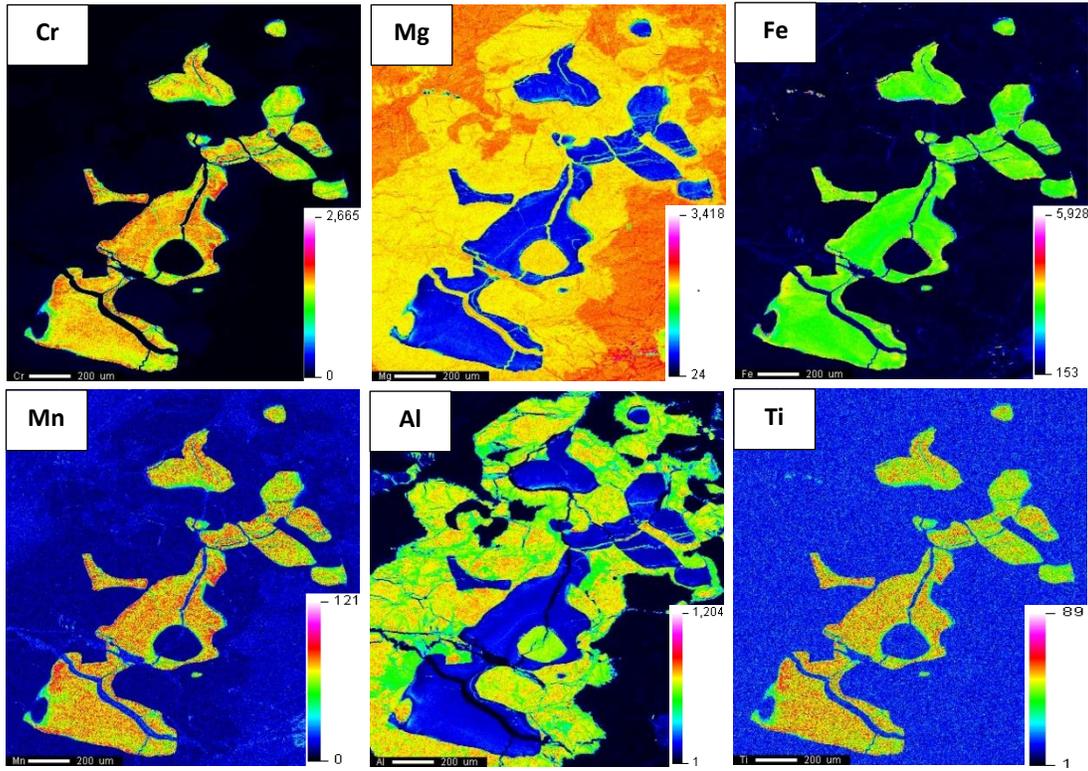
La distribución de elementos en la espinela porosa es más uniforme que las espinelas anteriores sin embargo, estas espinelas presentan un leve empobrecimiento en cromo, hierro y aluminio en sus bordes y fracturas, un leve enriquecimiento en magnesio en las fracturas y contenidos bajos a muy bajos pero uniformes en manganeso y titanio (Figura 4-21).

Figura 4-21: Mapas composicionales de las espinelas porosas, muestra Las Lauras IX 2261.16



Las espinelas porosas con corona de clorita presentan variaciones composicionales con relación a las demás espinelas. Estas espinelas tienen un enriquecimiento de cromo, manganeso y titanio en los centros del mineral, valores medios en hierro y valores muy bajos de magnesio y aluminio. En cuanto a la clorita vemos que está enriquecida en magnesio y aluminio sin contenidos de hierro. La clorita que está bordeando las espinelas presenta una transformación a serpentina tipo antigorita (Figura 4-22).

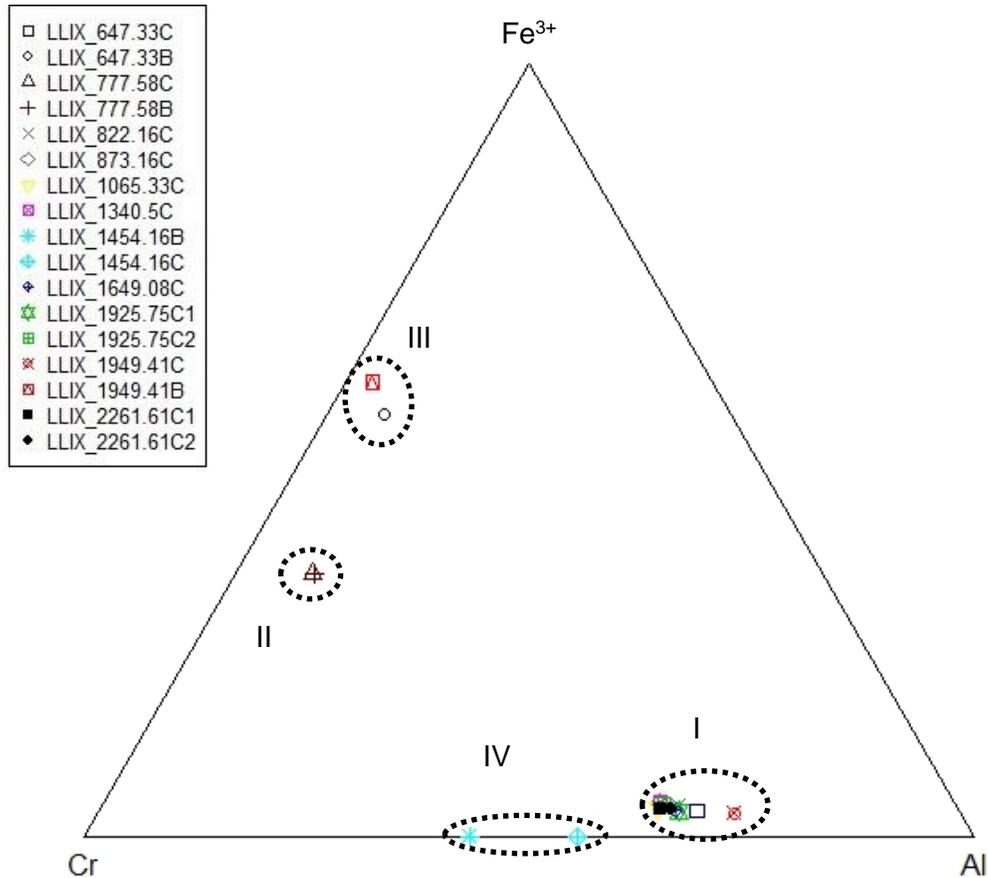
Figura 4-22: Mapas composicionales de las espinelas porosas con corona de clorita, muestra Las Lauras IX 777.58



Las espinelas también muestran cambios químicos relacionados con el porcentaje y tipo de alteración. Las zonadas (centro de espinela-borde de magnetita o magnesioferrita) y de bordes porosos, muestran enriquecimiento en Fe, Ti y Mn y se empobrecimiento en Al, Cr y Mg hacia los bordes del cristal, mientras que las que son totalmente porosas solamente presentan cambios como enriquecimientos en Fe y Mg, comparadas con las menos alteradas. Las espinelas que desarrollaron una corona de clorita, debido a su hidratación y la del olivino (Colás, 2015), presentan enriquecimientos de Fe, Cr y Mn hacia el borde del cristal, empobrecimientos de Al y Mg hacia los bordes y la corona de clorita esta más enriquecida en Mg y empobrecida en aluminio que el centro del cristal de espinela.

En el diagrama ternario de la Figura 4-23 podemos ver que los centros de todas las espinelas son altamente refractarios por su alto contenido en Al (grupo I), exceptuando la muestra Las Lauras IX 777.58 que es más rica en hierro y cromo que en aluminio (grupo II). Las espinelas alteradas a magnetita o magnesioferrita en los bordes, se enriquecieron en cromo y hierro (grupo III). La espinela totalmente porosa solo presentó un ligero enriquecimiento en cromo (grupo IV).

Figura 4-23: Diagrama de variación Fe³⁺-Al-Cr para las espinelas, grupo I: centros de espinelas, grupo II espinela con corona de clorita, grupo III bordes alterados de las espinelas no porosas y grupo IV espinela totalmente porosa²



4.3.2 Olivinos

Se analizaron olivinos sin alteración incluidos en piroxenos, otros cortados por venas de serpentina y otros rodeados por la serpentina en malla. Los olivinos analizados son en su mayoría ricos en magnesio y hierro. La composición de forsterita varía de 89 a 91% (Tabla 4-3).

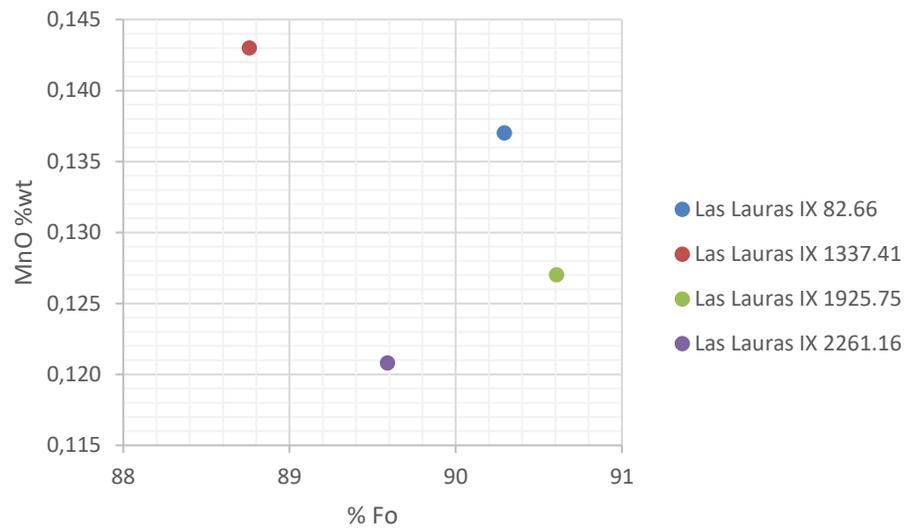
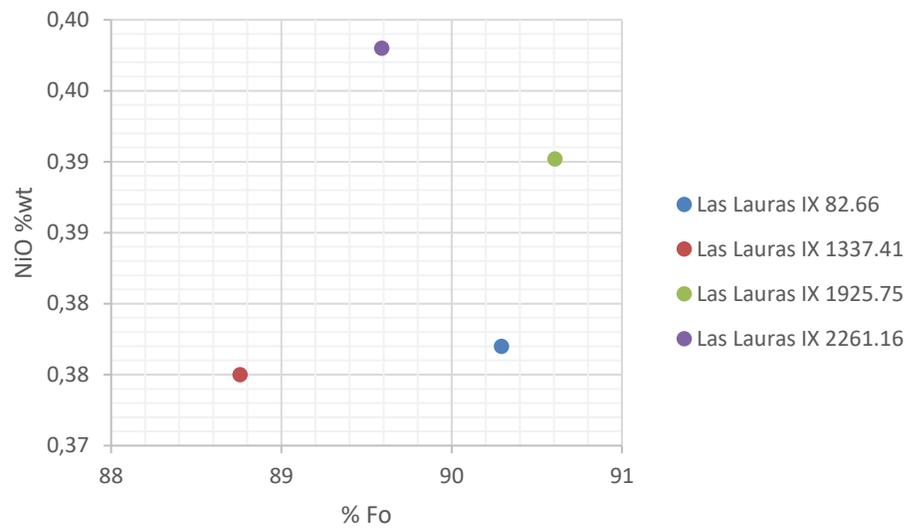
Tabla 4-3: Resultados de los análisis EPMA a los olivinos de las peridotitas y piroxenitas

² La letra B y C al final de la muestra significa borde y centro respectivamente

Muestra	Las Lauras IX 82.66		Las Lauras IX 1337.41	Las Lauras IX 1925.75		Las Lauras IX 2261.16	
	n=3	σ	n=1	n=5	σ	n=5	σ
Na₂O	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000	0,00
SiO₂	40,683	0,13	40,693	40,694	0,23	40,417	0,14
MgO	49,014	0,12	48,124	49,501	0,20	48,297	0,12
Al₂O₃	0,004	0,01	0,000	0,004	0,00	0,003	0,01
TiO₂	0,009	0,01	0,001	0,009	0,01	0,002	0,00
CaO	0,016	0,01	0,016	0,010	0,01	0,013	0,01
NiO	0,377	0,03	0,375	0,390	0,01	0,398	0,02
K₂O	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000	0,00
FeO	9,257	0,08	10,723	9,021	0,11	9,885	0,10
MnO	0,137	0,02	0,143	0,127	0,01	0,121	0,01
Cr₂O₃	0,000	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000	0,00
Total %wt	99,5	0,22	100	99,8	0,30	99,1	0,33
Fo	90	0,06	89	91	0,13	90	0,09
Fa	10	0,07	11	9	0,12	10	0,08

Los contenidos de Fo entre 89 y 92 reflejan contenidos ultramáficos (W. A. Deer, 1992). Los olivinos de las piroxenitas (Fo=90) tienen los contenidos más altos en NiO y más bajos en MnO. En el resto de los olivinos vemos que a medida que aumenta el contenido de forsterita aumenta también el contenido de NiO y disminuye el contenido de MnO (Figura 4-24).

Figura 4-24: Relación entre el porcentaje de forsterita y el contenido de óxidos mayores de NiO y MnO



4.3.3 Piroxenos

Los piroxenos presentes en las muestras analizadas varían tanto en sus contenidos de calcio como de magnesio (Tabla 4-4). Los clinopiroxenos son cálcicos, tipo diópsidos y los ortopiroxenos son enstatitas ricas en magnesio y mayor contenido de hierro que los clinopiroxenos. Los piroxenos de la rodingita (Las Lauras IX 372.58) son diópsidos, mientras que en las peridotitas y piroxenitas son tanto diópsidos como enstatitas (Figura 4-25).

Tabla 4-4: Contenido de óxidos en los piroxenos

	Las Lauras IX 1025.75		Las Lauras IX 1065.33				Las Lauras IX 1114.83		Las Lauras IX 1144.41		Las Lauras IX 1337.41	
	n=4	σ	n=7	σ	n=8	σ	n=4	σ	n=2	σ	n=2	σ
Na₂O	0,31	0,1	0,08	0,02	0,09	0,02	0,08	0,01	0,13	0,04	0,00	0,00
SiO₂	50,86	0,3	53,10	0,50	53,90	0,41	52,73	0,41	53,58	0,39	47,61	10,47
MgO	13,05	0,3	13,95	0,35	14,42	0,27	14,22	0,14	14,06	0,11	34,58	10,09
Al₂O₃	7,88	0,8	5,59	0,78	4,28	0,82	5,43	0,78	3,29	0,32	2,81	3,96
TiO₂	0,21	0,0	0,06	0,01	0,06	0,01	0,05	0,02	0,11	0,01	0,02	0,01
CaO	21,68	0,4	23,52	0,49	23,41	0,31	23,11	0,05	23,26	0,20	0,31	0,43
NiO	0,03	0,0	0,04	0,02	0,04	0,01	0,04	0,01	0,06	0,01	0,25	0,22
K₂O	0,01	0,0	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
FeO	4,61	0,2	3,55	0,18	3,67	0,22	3,29	0,17	5,55	0,14	14,81	4,38
MnO	0,08	0,0	0,07	0,01	0,08	0,01	0,07	0,01	0,10	0,01	0,14	0,01
Cr₂O₃	1,15	0,1	0,86	0,21	0,57	0,18	0,73	0,26	0,13	0,03	0,00	0,00
Total %wt	99,86	0,4	100,83	0,67	100,53	0,62	99,76	0,49	100,25	0,22	100,53	0,18
Wo	49,80	0,9	51,38	1,03	50,41	0,61	50,73	0,21	49,21	0,16	0,65	0,90
En	41,70	0,7	42,38	0,95	43,21	0,60	43,45	0,25	41,39	0,10	80,72	2,00
Fs	8,50	0,4	6,24	0,32	6,38	0,41	5,82	0,30	9,40	0,26	18,63	1,10

	Las Lauras IX 1337.41		Las Lauras IX 1340.5				Las Lauras IX 1417				Las Lauras IX 1624.16	
	n=2	σ	n=2	σ	n=2	σ	n=3	σ	n=3	σ	n=7	σ
Na₂O	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,12	0,02
SiO₂	44,57	10,44	55,52	0,25	51,69	0,63	54,76	0,10	51,72	0,14	53,90	0,41
MgO	35,70	10,06	27,78	0,48	28,75	0,97	27,78	0,20	29,03	0,24	14,12	0,19
Al₂O₃	3,10	4,38	5,64	0,04	6,39	0,02	5,76	0,32	6,49	0,25	3,97	0,61
TiO₂	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,00	0,05	0,01
CaO	0,39	0,52	0,99	0,58	1,46	1,14	0,83	0,45	0,82	0,28	23,45	0,22
NiO	0,23	0,21	0,09	0,00	0,09	0,03	0,09	0,01	0,08	0,01	0,04	0,01
K₂O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	14,79	4,45	10,14	0,07	10,17	0,44	10,02	0,21	10,22	0,17	3,97	0,28
MnO	0,13	0,01	0,12	0,00	0,11	0,00	0,11	0,02	0,13	0,00	0,07	0,02
Cr₂O₃	0,27	0,35	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,70	0,01	0,70	0,19
Total %wt	99,20	0,97	100,30	0,21	99,36	0,91	99,37	0,30	99,22	0,44	100,39	0,30
Wo	0,78	1,07	2,06	1,22	2,96	2,35	1,74	0,95	1,66	0,58	50,66	0,67
En	81,39	1,88	80,95	1,14	80,88	1,83	81,42	0,61	81,99	0,46	42,44	0,38
Fs	17,83	0,81	16,98	0,08	16,15	0,51	16,85	0,34	16,35	0,19	6,89	0,46

	Las Lauras IX 1649.08						Las Lauras IX 1796					
	n=6	σ	n=7	σ	n=4	σ	n=8	σ	n=2	σ	n=3	σ
Na₂O	0,16	0,03	0,14	0,02	0,01	0,01	0,05	0,02	0,07	0,00	0,01	0,00
SiO₂	52,71	0,56	53,02	0,43	52,39	0,30	53,24	0,77	52,64	0,52	51,85	0,28
MgO	13,56	0,40	13,82	0,31	29,08	0,15	14,32	0,59	13,92	0,20	28,07	0,83
Al₂O₃	5,54	0,84	5,09	0,74	5,91	0,25	4,51	0,85	6,03	0,44	6,08	0,14
TiO₂	0,13	0,02	0,13	0,02	0,04	0,01	0,05	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01
CaO	23,08	0,57	23,25	0,25	0,61	0,16	23,00	0,66	22,94	0,03	2,13	1,31
NiO	0,03	0,02	0,04	0,01	0,09	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,08	0,02
K₂O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

FeO	3,50	0,34	3,45	0,21	10,41	0,12	3,47	0,24	3,51	0,06	10,05	0,42
MnO	0,06	0,01	0,07	0,01	0,13	0,01	0,06	0,01	0,06	0,02	0,11	0,02
Cr2O3	0,94	0,13	0,83	0,18	0,73	0,04	0,63	0,21	0,96	0,08	0,74	0,01
Total %wt	99,72	0,29	99,85	0,39	99,38	0,46	99,40	0,60	100,22	0,28	99,14	0,38
Wo	51,56	1,28	51,38	0,69	1,23	0,31	50,32	1,58	50,83	0,31	4,34	2,67
En	42,15	0,95	42,48	0,54	82,11	0,41	43,58	1,36	42,92	0,29	79,54	2,04
Fs	6,29	0,61	6,15	0,37	16,66	0,13	6,11	0,40	6,25	0,03	16,12	0,63

	Las Lauras IX 201.33		Las Lauras IX 2226.66		Las Lauras IX 2261.16		Las Lauras IX 265.13					
	n=4	σ	n=5	σ	n=5	σ	n=5	σ	n=4	σ	n=6	σ
Na2O	0,11	0,01	0,14	0,01	0,11	0,02	0,01	0,05	0,06	0,03	0,06	0,02
SiO2	53,36	0,59	53,86	0,33	54,39	0,21	52,37	0,33	54,06	0,15	53,27	0,17
MgO	14,02	0,27	14,18	0,27	14,32	0,13	28,79	0,16	14,25	0,07	14,06	0,56
Al2O3	5,10	0,52	2,31	0,40	1,94	0,15	5,42	0,44	3,79	0,54	5,05	0,26
TiO2	0,09	0,01	0,06	0,01	0,05	0,00	0,02	0,01	0,05	0,02	0,05	0,02
CaO	23,21	0,20	23,21	0,17	23,43	0,19	0,49	0,06	23,55	0,20	22,85	1,16
NiO	0,04	0,01	0,04	0,01	0,03	0,02	0,09	0,01	0,04	0,01	0,05	0,01
K2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
FeO	3,94	0,16	5,49	0,18	4,72	0,66	11,60	0,15	3,32	0,20	3,92	0,53
MnO	0,09	0,01	0,10	0,02	0,09	0,02	0,14	0,01	0,05	0,00	0,07	0,01
Cr2O3	0,43	0,07	0,10	0,01	0,11	0,02	0,56	0,06	0,60	0,05	0,79	0,09
Total %wt	100,38	0,61	99,50	0,51	99,19	0,58	99,47	0,12	99,78	0,42	100,17	0,25
Wo	50,57	0,50	49,02	0,49	49,70	0,72	0,99	0,12	51,14	0,30	50,13	2,59
En	42,50	0,47	41,68	0,57	42,26	0,55	80,62	0,15	43,06	0,12	42,93	1,67
Fs	6,93	0,30	9,30	0,30	8,04	1,06	18,39	0,15	5,80	0,37	6,93	0,93

Las Lauras IX 372.58		Las Lauras IX 647.33		Las Lauras IX 82.66		Las Lauras IX 822.16	
n=4	σ	n=4	σ	n=7	σ	n=1	n=4
						σ	σ

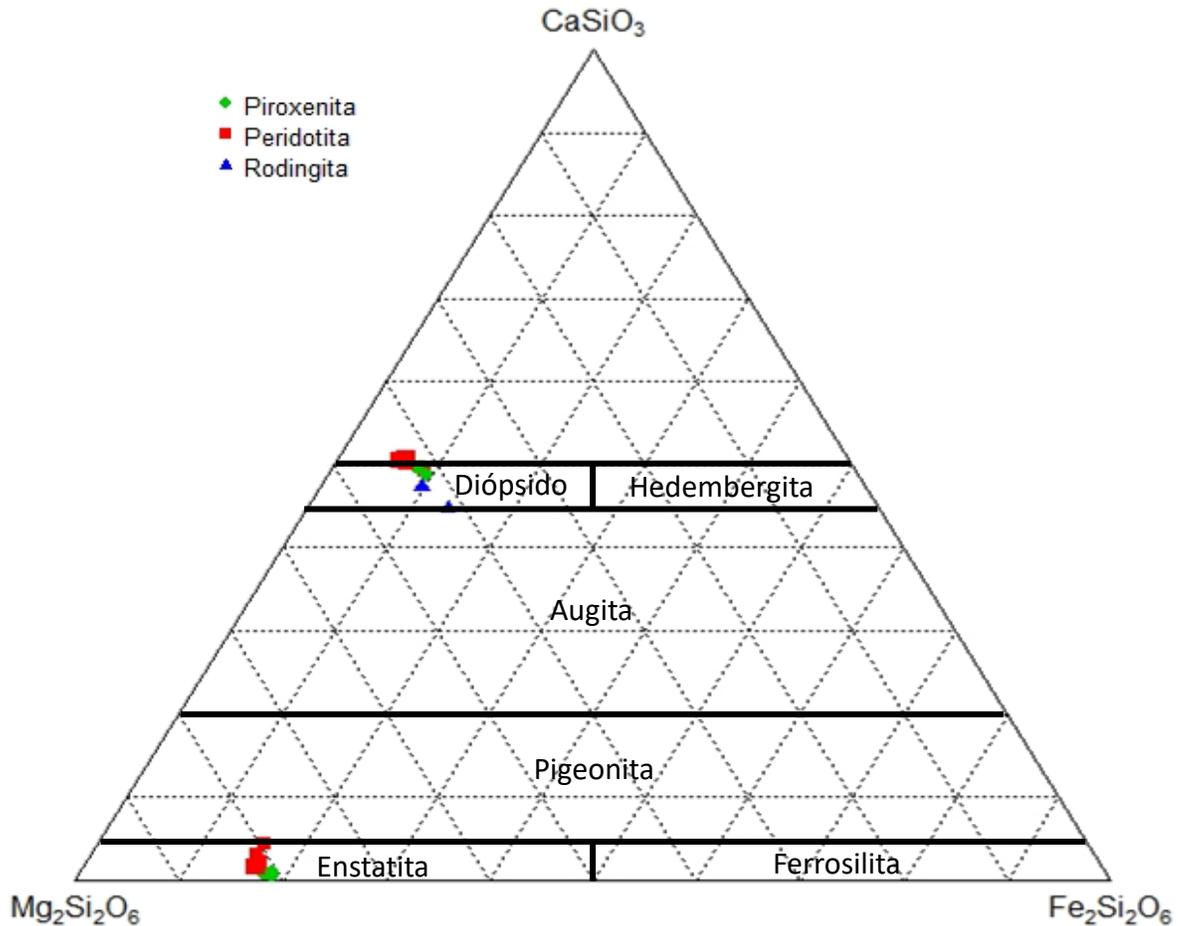
Nuevos Aportes al Entendimiento de la Evolución Geotectónica del Noroccidente
Colombiano Mediante el Estudio Petrográfico y Geoquímico del Basamento de la
Cuenca Sinú-San Jacinto

Na₂O	0,15	0,02	0,16	0,04	0,11	0,03	0,02	0,00	0,01	0,13	0,03
SiO₂	52,47	0,66	53,75	1,01	53,80	0,61	51,26	51,22	0,26	52,40	0,28
MgO	14,10	0,42	14,62	0,64	14,07	0,36	28,56	28,22	0,17	13,54	0,22
Al₂O₃	3,15	0,73	2,25	0,88	4,18	1,28	6,04	6,15	0,13	4,96	0,66
TiO₂	0,20	0,01	0,14	0,05	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01
CaO	21,10	0,34	22,41	0,56	23,62	0,19	0,64	0,64	0,09	22,56	1,23
NiO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01	0,09	0,09	0,01	0,03	0,01
K₂O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
FeO	8,10	0,23	5,84	1,21	3,36	1,50	10,31	10,43	0,12	3,59	0,09
MnO	0,10	0,02	0,07	0,02	0,07	0,02	0,12	0,13	0,01	0,06	0,01
Cr₂O₃	0,36	0,09	0,60	0,09	0,65	0,22	0,65	0,70	0,05	0,89	0,13
Total %wt	99,76	0,49	99,86	0,20	99,95	0,66	97,70	97,59	0,33	98,21	0,91
Wo	44,75	1,07	47,27	0,71	51,45	0,42	1,32	1,33	0,18	50,91	1,41
En	41,61	0,91	42,91	1,46	42,63	0,64	81,93	81,58	0,25	42,55	1,06
Fs	13,64	0,33	9,82	2,15	5,92	0,40	16,74	17,09	0,13	6,54	0,39

	Las Lauras IX 822.16				Las Lauras IX 873.16			
	n=5	σ	n=6	σ	n=4	σ	n=4	σ
Na₂O	0,15	0,11	0,10	0,02	0,05	0,01	0,05	0,02
SiO₂	52,62	0,47	52,63	0,64	53,43	0,26	52,93	0,21
MgO	13,80	0,31	13,40	0,40	14,07	0,08	13,87	0,11
Al₂O₃	4,37	1,42	4,64	1,37	4,67	0,42	5,86	0,61
TiO₂	0,05	0,01	0,04	0,02	0,05	0,01	0,05	0,01
CaO	22,99	0,59	23,58	0,33	23,59	0,29	23,49	0,12
NiO	0,04	0,01	0,03	0,01	0,04	0,01	0,04	0,01
K₂O	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	3,68	0,14	3,53	0,30	3,45	0,21	3,76	0,10
MnO	0,07	0,01	0,06	0,01	0,07	0,01	0,07	0,02
Cr₂O₃	0,67	0,24	0,74	0,32	0,71	0,10	0,93	0,14

Total %wt	98,45	0,93	98,75	0,86	100,14	0,92	101,05	0,44
Wo	50,91	0,88	52,33	0,81	51,33	0,56	51,27	0,24
En	42,53	0,93	41,38	0,77	42,61	0,32	42,14	0,18
Fs	6,56	0,24	6,29	0,54	6,06	0,34	6,59	0,21

Figura 4-25: Clasificación de piroxenos



4.3.4 Serpentininas

El contenido de óxidos en las serpentininas varía de acuerdo con la textura en las muestras analizadas (Tabla 4-5), la Figura 4-26 muestra las distribuciones magnesio, aluminio y silicio con respecto al hierro y la variación de cromo con respecto al níquel.

Tabla 4-5: Rango de porcentaje en peso de óxidos analizados en las serpentinas

Muestra	Las Lauras IX 82.66	Las Lauras IX 265.13	Las Lauras IX 647.33	Las Lauras IX 822.16	Las Lauras IX 876.16	Las Lauras IX 1065.33	
Serpentina	Bastitas	Nucleo de la malla	Serpentina interpenetrativa	Nucleo de la malla	Nucleo de la malla	vena fibrosa de serpentina	Borde de la malla
Textura	Seudomorfa	Seudomorfa	No pseudomorfa	Seudomorfa	Seudomorfa	Seudomorfa	Seudomorfa
Na ₂ O	0-0.027	0-0.36	0-0.03	0-0.04	0-0.03	0-0.01	0-0.03
SiO ₂	38.08-40.47	39.08-41.39	39.46-41.70	37.65-40.54	36.65-41.54	39.25-39.97	39.51-41.05
MgO	36.71-38.92	39.26-40.29	38.27-41.37	37.30-39.57	39.24-42.90	38-38.06	39.14-41.02
Al ₂ O ₃	1.35-2.19	0.45-0.82	0.27-0.44	0.60-1.40	0.31-1	0.68-0.73	0.47-0.82
TiO ₂	0-0.023	0-0.019	0-0.003	0-0.01	0-0.02	0	0
CaO	0-0.27	0.29-0.40	0.04-0.10	0-0.78	0.18-0.49	0.13-0.16	0.32-0.51
NiO	0-0.15	0.02-0.54	0.01-0.04	0-0.38	0.03-0.4	0.001-0.007	0.15-0.78
K ₂ O	0-0.013	0-0.007	0	0-0.01	0	0-0.01	0
FeO	0-6.93	5.18-7.68	4.29-6.56	2.70-7.80	3.92-8.15	6.67-7.15	4.92-6.17
MnO	0-0.12	0.05-0.11	0.04-0.07	0.09-0.20	0.04-0.09	0.12	0.07-0.10
Cr ₂ O ₃	0-0.62	0-0.2	0.21-0.64	0-0.52	0-0.35	0.02-0.03	0-0.03

Muestra	Las Lauras IX 1114.83	Las Lauras IX 1144.41		Las Lauras IX 1257.25	Las Lauras IX 1566.46	Las Lauras IX 1586.66	Las Lauras IX 1624.16	Las Lauras IX 1712.33	
Serpentina	Bastitas	Reloj de arena	Seudomorfo de Px	Núcleo de malla	Vena	Borde de la malla	Reloj de arena	Vena	Serpentina interpenetrativa
Textura	Seudomorfa	Seudomorfa	Seudomorfa	Seudomorfa	Vena	Seudomorfa	Seudomorfa	Vena	No pseudomorfa
Na ₂ O	0.01	0.01-0.03	0.02-0.04	0.03	0-0.07	0.04-0.06	0.03-0.08	0-0.02	0-0.4
SiO ₂	36-41.87	40.44-41.67	39-41.04	38.05	41.04-44.08	38.8-41.19	35.86-40.69	40.80-42.72	36.91-43.07
MgO	39.03-43.44	40.86-42.27	38.51-41.53	39.06	38.38-41.70	38.78-41.14	41.25-43.79	38.94-42.38	37.09-39.40
Al ₂ O ₃	0.63-1.36	0.94-1.10	0.92-1.91	2.31	0.52-0.66	0.56-1.21	0.95-1.99	0.77-0.9	0.79-10.26
TiO ₂	0-0.02	0-0.02	0.01-0.03	0	0	0-0.02	0	0-0.01	0
CaO	0.31-0.39	0.31-0.37	0.23-0.62	0.28	0.06-0.07	0.22-0.86	0.24-0.44	0.04-0.45	0.02-0.06
NiO	0.38-0.54	0.04-0.45	0.03-0.41	0.09	0-0.01	0.03-0.24	0.06-0.59	0-0.24	0.13-0.19

K2O	0	0	0	0	0-0.03	0-0.01	0	0	0
FeO	6.39-8.26	2.63-4.22	2.6-4.2	8.20	6.46-7.34	5.64-7.20	4.50-7.25	4.09-8.48	6.53-7.12
MnO	0.07-0.09	0.05-0.07	0.06-0.11	0.13	0.13-0.17	0.07-0.15	0.07-0.10	0.06-0.11	0.05-0.14
Cr2O3	0.01-0.69	0.02-0.04	0-0.17	0.87	0-0.3	0.01-0.75	0.01-0.67	0-0.04	0.09-0.48

Muestra	Las Lauras IX 1796			Las Lauras IX 1925.75					Las Lauras IX 2226.66
Serpentina	Bastitas	Seudomorfo de Px	Serpentina interpenetrativa	Seudomorfo de Px	Borde de la malla	Seudomorfo de Px	Serpentina interpenetrativa	Serpentina interpenetrativa	Seudomorfo de Px
Textura	Seudomorfa	Seudomorfa	No seudomorfa	Seudomorfa	Seudomorfa	Seudomorfa	No seudomorfa	No seudomorfa	Seudomorfa
Na2O	0-0.03	0-0.02	0	0	0-04	0.01-0.06	0.10-0.13	0-0.07	0.01-0.10
SiO2	39.56-40.88	39.04-39.60	36.36	40.19	39.30-41.35	40.09-41.96	35.3-36.56	38.79-41.23	38.64-41.07
MgO	38.77-41.60	38.98-41.40	40.91	39.80	39.89-41.80	39.32-41.40	32.26-33.96	38.24-41.35	34.02-36
Al2O3	1.98-2.38	1.80-2.11	2.81	1.26	0.72-1.48	0.73-1.27	9.42-10.73	4.08-7.40	0.84-1.61
TiO2	0-0.02	0-0-02	0.01	0	0-0.02	0-0.03	0.01	0-0.05	0-0.02
CaO	0.41-2.05	0.54-0.64	0.397	0.549	0.25-0.67	0.27-0.58	0.26-0.38	0.14-0.18	0.09-1.04
NiO	0-0.58	0.01-0.05	0.083	0.035	0-1.22	0.01-0.79	0.11-0.13	0.1-0.55	0.01-0.1
K2O	0	0	0.005	0.003	0-0.01	0	0.01-0.03	0	0-0.02
FeO	4.37-5.91	3.64-5.06	4.54	4.67	3.86-5.59	4.23-5.35	10.04-12.61	4.02-5.47	8.67-12.57
MnO	0.09-0.11	0.07-0.09	0.08	0.105	0.06-0.26	0.10-0.14	0.10-0.15	0.04-0.09	0.19-0.21
Cr2O3	0.70-1.07	0.42-0.99	0.83	0.502	0-0.59	0.01-0.25	0.16-0.22	0.02-0.16	0.08-0.15

Según el contenido de Mg y Fe en las serpentinas se pueden distinguir tres grupos basados en el aumento o disminución de los contenidos de ambos elementos, probablemente debido a la disponibilidad de éstos en el fluido al momento de la alteración (Figura 4-26a). Cabe resaltar que el grupo II comprende los núcleos de la malla de serpentina y antigoritas sobreimpuestas a la malla y el grupo III son algunas bastitas y antigoritas sobreimpuestas.

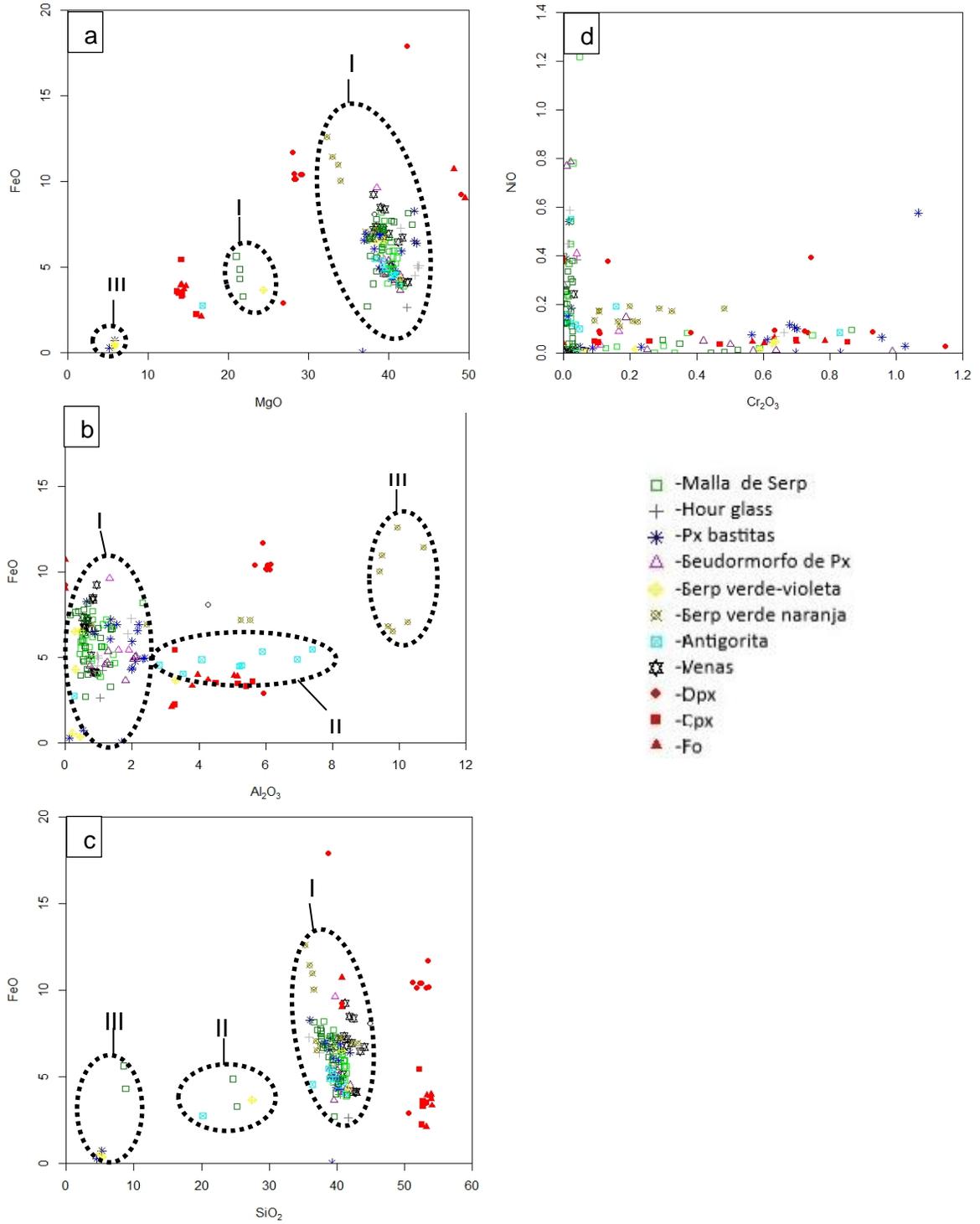
Respecto a los contenidos de aluminio se observa que las mayoría de las serpentinas tienen bajos contenidos de este óxido (grupo I), mientras que las fases de serpentina/clorita tienen los mayores valores (grupo III) y las antigoritas sobreimpuestas (grupo II) tienen valores variables entre las del grupo I y el grupo III, ya que algunas de estas se mezclan con cloritas en la corona de reacción de las espinelas (Figura 4-26b).

El contenido de silicio en las serpentinas es generalmente menor que los minerales primarios y se distinguen al igual que con el magnesio tres grupos: el grupo I lo componen la mayoría de serpentinas analizadas; el grupo II presenta contenidos intermedios y está compuesto por las antigoritas sobreimpuestas y algunos núcleos de la malla; el grupo III está conformado por algunas bastitas, núcleos de malla y antigoritas sobreimpuestas (Figura 4-26c).

Teniendo en cuenta las distribuciones de Mg y Si, se puede decir que al inicio de la alteración había más disponibilidad de estos elementos en el fluido lo que permitió la formación de serpentinas más enriquecidas en éstos como las mallas de lizardita, la textura de reloj de arena y los pseudomorfos, mientras que el fluido que formó, las bastitas y la antigorita sobreimpuesta tenía menor disponibilidad de estos elementos debido posiblemente a que se habían consumido en la mayoría de los minerales primarios. Las venas de serpentina se agrupan siempre en el grupo I, es decir que los fluidos que formaron estos minerales tenían proporciones similares de estos óxidos.

El cromo presenta generalmente contenidos variables tanto en la serpentinas como en los minerales primarios. Las venas de serpentina tienen menor contenido de níquel y cromo que los minerales primarios y que las demás serpentinas; las bastitas son las que presentan mayores contenidos de cromo, mientras que la textura en malla contiene bajos contenidos de cromo y variables contenidos de hierro (Figura 4-26d).

Figura 4-26: Distribución de óxidos mayores en las serpentinas



4.4 Geoquímica de roca total

La muestra Las Lauras IX 1025.75 tiene un porcentaje bajo de LOI, ya que es una piroxenita con poca alteración, mientras que los porcentajes más altos de LOI los presentan la peridotita alterada a serpentinita pseudomorfa y no pseudomorfa (14.01 y 14.09 respectivamente). El porcentaje de alteración en la rodingita (LOI=7.06) no es muy alto a pesar de que la roca se encuentra totalmente alterada (Tabla 4-6).

Tabla 4-6 Resultados de los análisis para óxidos mayores, elementos de tierras raras y elementos traza

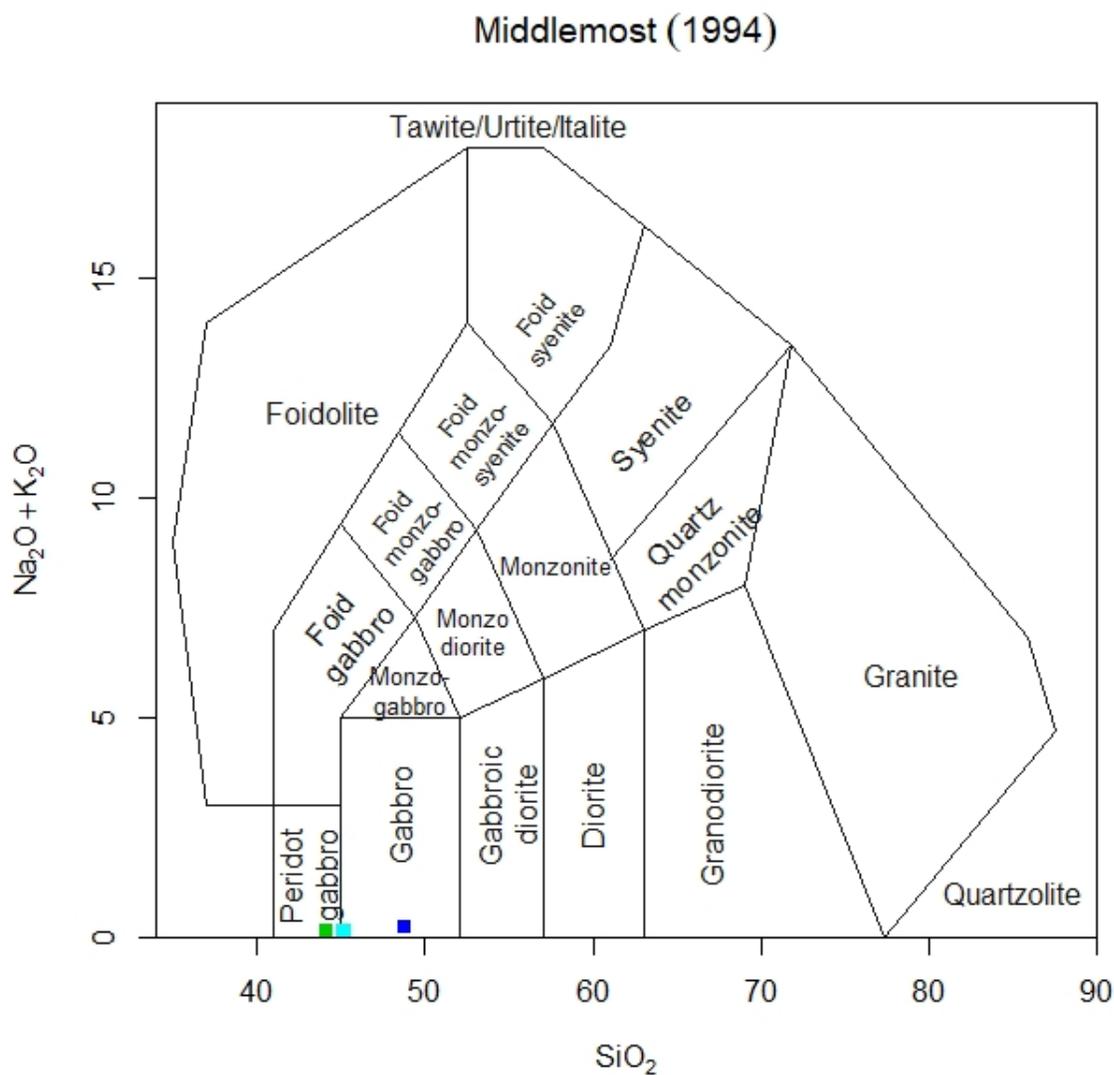
Muestra	Límite de detección	Las Lauras IX	Las Lauras IX	Las Lauras IX	Las Lauras IX
		368.91	1114.83	1025.75	1712.33
tipo de roca		Rodingita	Peridotita serpentinizada (Liz)	Piroxenita	Peridotita serpentinizada (Atg)
SiO ₂	99,94 %wt	38,26	37,41	45,85	38,28
TiO ₂	<0.01 %wt	0,77	0,01	0,22	0,05
Al ₂ O ₃	<0.01 %wt	8,93	0,95	3,61	3,55
Cr ₂ O ₃	<0.01 %wt	0,02	0,33	1,11	0,61
MgO	0,01 %wt	5,79	37,8	20,9	34,5
Fe ₂ O ₃	<0.01 %wt	9,7	7,24	6,02	6,9
MnO	<0.01 %wt	0,15	0,1	0,12	0,1
CaO	<0.01 %wt	27,9	1,21	17	1,25
Na ₂ O	<0.01 %wt	0,66	0,1	0,19	0,09
K ₂ O	<0.01 %wt	0,02	<0.01	<0.01	<0.01
BaO	<0.01 %wt	0,01	0,01	0,01	0,01
P ₂ O ₅	<0.01 %wt	0,15	<0.01	<0.01	<0.01
SO ₃	0,01 %wt	<0.01	0,04	0,01	<0.01
SrO	<0.01 %wt	0,01	0,01	<0.01	<0.01
LOI	-	7,06	14,01	4,77	14,09
Li	<0.1 ppm	13,8	0,4	4,2	2,6
Co	<0.001 ppm	36,7	93,4	23,9	63,7
Ni	<0.04 ppm	47,4	1935	340	1350
Cu	<0.01 ppm	68,1	14,3	40	2,27
As	<0.01 ppm	0,54	0,12	0,36	0,49
Rb	<0.005 ppm	1,39	0,032	0,067	0,045
Sr	<0.01 ppm	53,5	1,8	0,63	0,36
Y	<0.003 ppm	17	0,139	2,75	1,09
Zr	<0.01 ppm	19,85	0,03	1,05	1,69
Nb	<0.002 ppm	0,031	<0.002	<0.002	<0.002
Cd	<0.001 ppm	0,106	0,005	0,026	0,015
Cs	<0.005 ppm	0,274	<0.005	0,007	0,006

Ba	<0.5 ppm	5,5	0,8	<0.5	<0.5
La	<0.002 ppm	3,04	0,011	0,057	0,387
Ce	<0.003 ppm	8	0,021	0,225	0,703
Pr	<0.002 ppm	1,175	<0.002	0,038	0,066
Nd	<0.002 ppm	6,19	0,009	0,346	0,298
Sm	<0.002 ppm	1,79	<0.002	0,178	0,07
Eu	<0.002 ppm	0,621	<0.002	0,062	0,039
Gd	<0.002 ppm	2,26	0,005	0,302	0,084
Tb	<0.001 ppm	0,392	0,001	0,061	0,017
Dy	<0.002 ppm	2,55	0,013	0,436	0,141
Ho	<0.001 ppm	0,548	0,005	0,096	0,037
Er	<0.002 ppm	1,69	0,017	0,305	0,129
Tm	<0.001 ppm	0,253	0,005	0,044	0,023
Yb	<0.002 ppm	1,61	0,037	0,278	0,169
Lu	<0.001 ppm	0,24	0,007	0,038	0,029
Hf	<0.002 ppm	0,407	<0.002	0,032	0,041
Ta	<0.005 ppm	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
W	0,002 ppm	3,35	0,581	12,4	0,902
Pb	<0.005 ppm	1,545	0,71	0,545	1,625
Th	<0.002 ppm	0,185	<0.002	0,006	0,034
U	<0.005 ppm	0,077	<0.005	<0.005	0,012
Au	<0.0002 ppm	0,0101	0,0037	0,013	0,0033
Ag	<0.001 ppm	0,306	0,061	0,88	0,071
Al	<0.01 %wt	4,38	0,32	0,7	0,95
B	<10 ppm	10	<10	<10	10
Be	<0.01 ppm	0,19	<0.01	<0.01	<0.01
Bi	<0.0005	0,0086	0,0009	0,0021	0,0025
Ca	<0.01 %wt	16,9	0,3	1,97	0,8
Cr	<0.01 ppm	121,5	764	3030	1790
Fe	<0.001 %wt	6,45	4,53	2,72	4,09
Ga	0,004 ppm	3,71	0,686	0,869	1,945
Ge	0,008 ppm	0,198	0,154	0,093	0,17
Hg	<0.004 ppm	<0.004	0,004	0,004	<0.004
In	<0.005 ppm	0,05	0,005	0,008	0,009
K	<0.01 %wt	0,02	<0.01	<0.01	<0.01
Mg	<0.01 %wt	3,16	20,1	6,54	17,1
Mn	<0.1 ppm	1035	711	345	710
Mo	<0.01 ppm	0,12	0,1	0,14	0,17
Na	0,001 %wt	0,529	0,019	0,015	0,012
P	<0.001 %wt	0,067	<0.001	<0.001	<0.001
Pd	<0.001 ppm	0,013	0,006	<0.001	0,005
Pt	<0.002 ppm	0,012	0,007	<0.002	0,004
Re	<0.0002 ppm	0,0002	0,0002	0,0006	0,0021
S	<0.01 %wt	<0.01	0,02	<0.01	<0.01
Sb	<0.005 ppm	0,065	0,006	0,027	0,015
Sc	0,007 ppm	34,4	8,15	17,1	17,85
Se	<0.003 ppm	0,014	0,052	0,008	0,016
Sn	<0.01 ppm	0,39	0,11	0,27	0,22

Te	<0.003 ppm	0,003	0,006	0,003	0,008
Ti	<0.001 %wt	0,333	0,003	0,047	0,012
Tl	<0.001 ppm	0,001	<0.001	<0.001	<0.001
V	0,1 ppm	226	28,9	107,5	58,4
Zn	<0.1 ppm	86,3	35,6	9,2	22,3

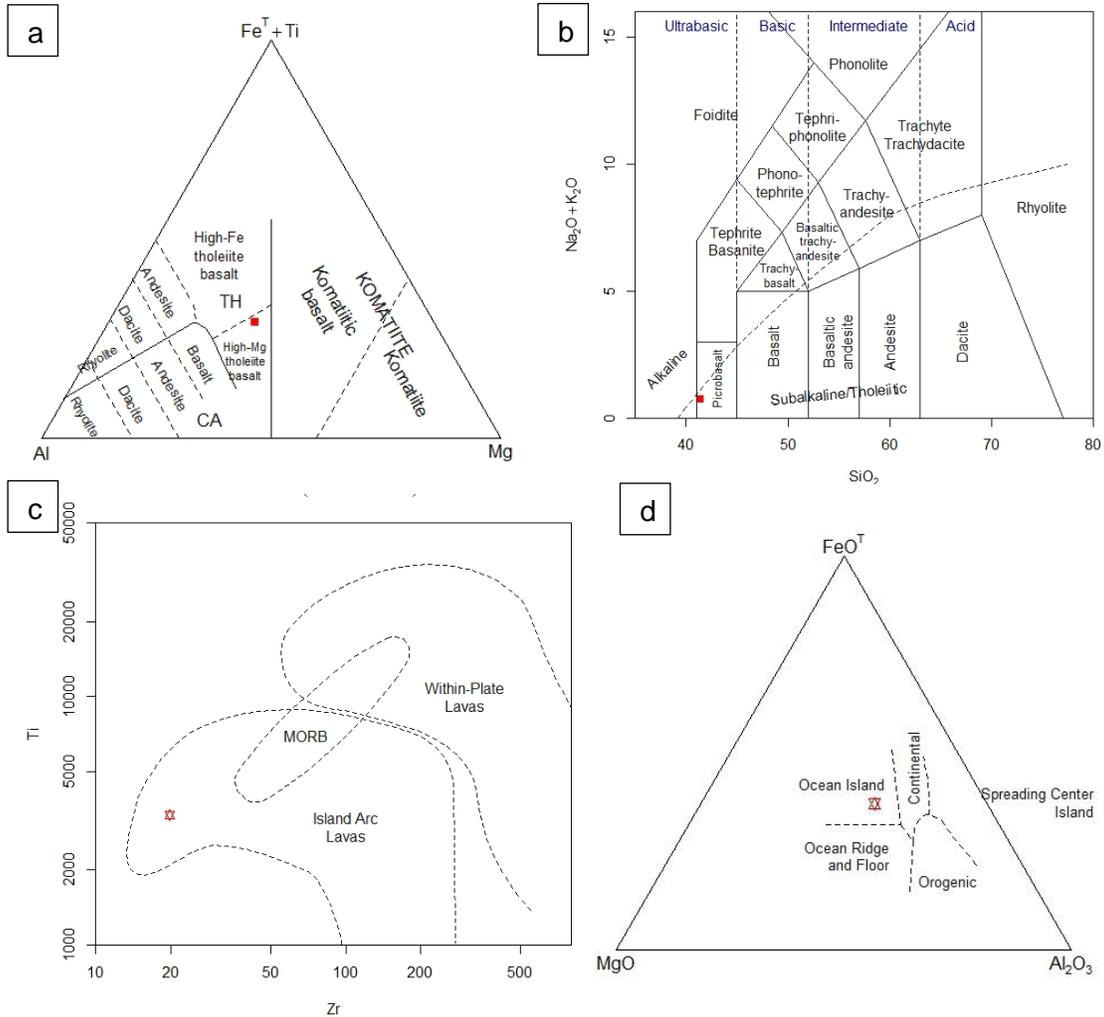
Según el contenido de SiO₂ vs. Na₂O+K₂O en el diagrama de clasificación TAS de Middelmost (1994) para rocas plutónicas, las rocas alteradas a serpentina son peridotitas, mientras que la piroxenita se asemeja a la composición gabroidea (Figura 4-27).

Figura 4-27: diagrama de clasificación SiO₂ vs. Na₂O+K₂O para rocas plutónicas



Según los diagramas de clasificación composicional para rocas volcánicas (Figura 4-28a, b), basados en el contenido de $\text{Fe}^{\text{T}} + \text{Ti} - \text{Al} - \text{Mg}$, la rodingita proviene de un basalto toleítico rico en magnesio. Según el contenido de SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ es un picrobasalto ultrabásico. Los diagramas de clasificación geotectónica para los basaltos (Figura 4-28c, d), indican que según el contenido de Zr vs. Ti, la rodingita se generó en un arco de islas, pero según el contenido de óxidos ($\text{FeO}^{\text{T}} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$), pertenece a una isla oceánica.

Figura 4-28: Diagramas de clasificación composicional y geotectónica para basaltos³



La relación de MgO/SiO_2 para las serpentinitas es 1.01 y 0.9, lo cual refleja la composición de las lherzolitas y harzburgitas (Deschamps et al., 2013), mientras que la relación

³ a y b diagramas composicionales para rocas volcánicas de Jensen 1976 y Le Bas et al., 1986 respectivamente, c y d diagramas geotectónicos para basaltos de Pearce 1982 y Pearce et al., 1977 respectivamente.

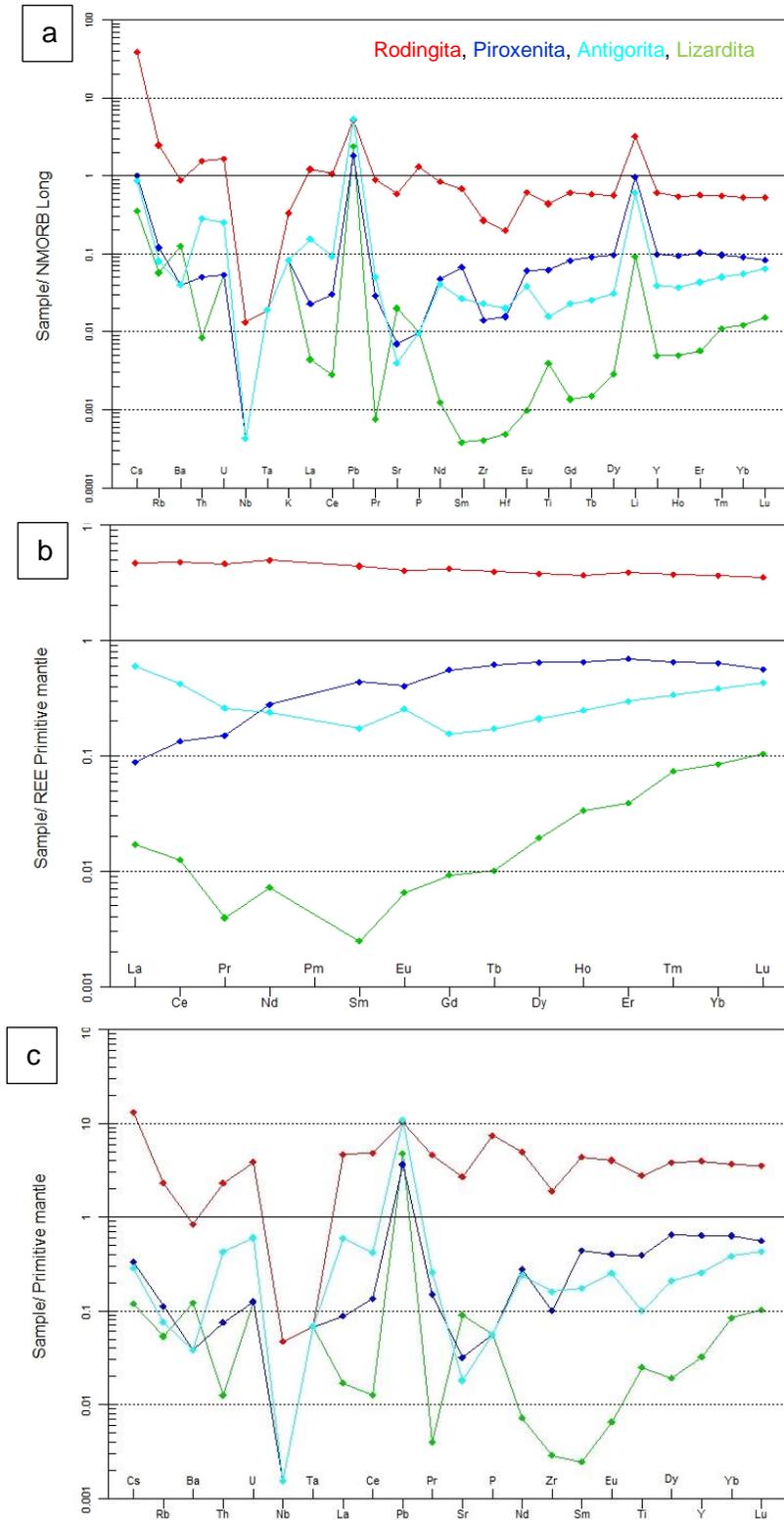
MgO/SiO₂ para la rodingita y la piroxenita es 0.15 y 0.46 respectivamente, debido a que son rocas más diferenciadas.

Todos los patrones de elementos traza y REE normalizados con respecto a NMORB son muy parecidos, se destacan las anomalías positivas en Cs, U, Pb y Li, debido al alto contenido de estos en los elementos móviles del fluido (FME) y la anomalía negativa muy marcada en Nb (en serpentinas y piroxenitas) respecto a sus vecinos, probablemente por la incompatibilidad de este elemento durante la fusión del manto (Figura 4-29a y c). Los patrones de tierras raras (REE) en las muestras normalizadas con respecto al manto primitivo, son relativamente planos, excepto por la serpentinita dominada por lizardita que presenta un patrón en forma de U (Figura 4-29b). La muestra de piroxenita (Las Lauras IX 1025.75) presenta un enriquecimiento de LREE, mientras que la serpentina pseudomorfa (Las Lauras IX 1114.83) y la no pseudomorfa (Las Lauras IX 1712.33) presentan patrones de empobrecimiento de LREE y enriquecimientos de HREE. La rodingita está muy enriquecida en REE, alrededor de 3.2 a 4.6 ppm por encima de la composición del manto primitivo. La serpentinita dominada por lizardita presenta anomalías negativas en Th y Sm y positivas en Ba y Sr que la diferencian de las demás muestras.

El comportamiento más enriquecido de los elementos traza y REE de la antigorita en comparación con la lizardita, puede deberse a que la antigorita fue hidratada dos veces, la primera por los fluidos de baja temperatura que forman lizardita y crisotilo y la segunda vez por fluidos de mayor temperatura que forman antigorita. Los patrones más enriquecidos en la piroxenita y la rodingita se debe a que son rocas más diferenciadas que las serpentinitas y tienen mayor contenido de clinopiroxeno.

Figura 4-29: patrones de distribución de elementos de tierras raras y elementos traza en las muestras analizadas⁴

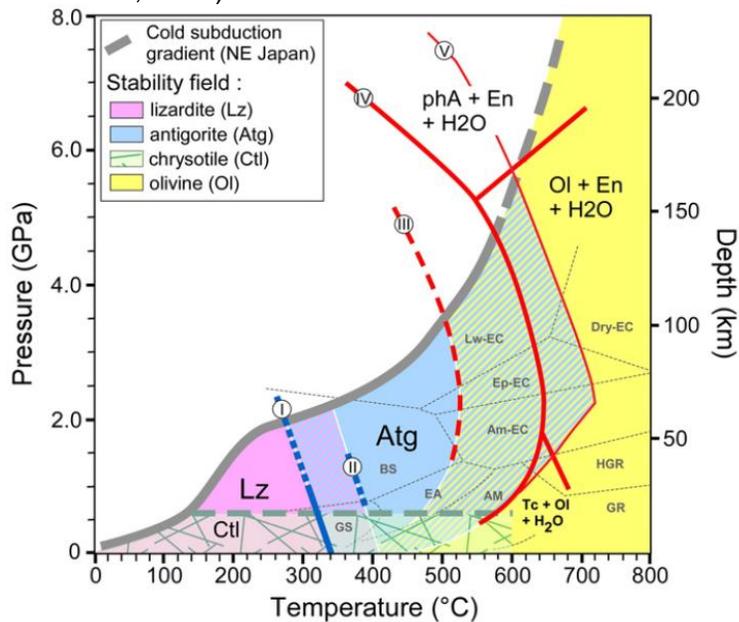
⁴ a) comparación de los patrones de elementos traza y REE, normalizados con respecto a NMORB, b) patrones de elementos REE normalizados con respecto al manto primitivo (McDonough & Sun, 1995), c) patrones de elementos traza y REE, normalizados con respecto al manto primitivo (McDonough & Sun, 1995)



5. Discusión

Los posibles protolitos de serpentinitas en el pozo Las Lauras son lherzolitas, harzburgitas y piroxenitas, determinadas a partir de la proporción de los relictos de minerales previos a la alteración (Olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno y espinela) preservados en la roca y la relación MgO/SiO_2 . Estas rocas presentan dos texturas de alteración, la primera de baja temperatura y la segunda de intermedia a alta temperatura (0 a 300°C y >320°C respectivamente) (Guillot et al., 2015) (Figura 5-1).

Figura 5-1: Diagrama de presión-temperatura con los campos de estabilidad de las serpentinitas de (Guillot et al., 2015)⁵



⁵ línea I: inicio de desestabilización de la lizardita en antigorita, II: límite máximo de estabilidad de la lizardita, III: inicio de la deshidratación en ausencia de agua, IV: límite de estabilidad de la antigorita en el MSH, V: desintegración de la antigorita

La alteración de baja temperatura genera en la roca una textura denominada pseudomorfa (Wicks, 1977) que se forma principalmente por la alteración de los olivinos generando una textura de malla aleatoria, en ocasiones doble que está compuesta por crisotilos+lizardita hacia el centro y hacia los bordes por lizardita. Los núcleos de la malla están compuestos de relictos de olivino o de crisotilo+lizardita tanto los que son en reloj de arena como los isotrópicos. El olivino comienza a alterarse a temperaturas más bajas que el piroxeno (Deschamps et al., 2013) por lo que es común encontrar cristales de piroxenos inalterados o con leve alteración en los bordes entre la textura en malla.

Al aumentar la temperatura de los fluidos, los ortopiroxenos comienzan a alterarse a crisotilo en forma de bastitas o a un pseudomorfo de lizardita. Durante esta primera alteración comienza a formarse magnetita en los bordes y fracturas del olivino y en los centros de la malla de lizardita, como consecuencia de que las serpentinas no puedan incorporar tanto hierro en su estructura, dejando el exceso de hierro libre para formar magnetita (W. A. Deer, 1992), los clinopiroxenos son menos susceptibles de alterarse que los ortopiroxenos en la alteración pseudomorfa.

Durante el proceso de alteración pseudomorfa se forman 4 clases de venas de serpentina diferentes, las más comunes son las tipo 2, que corresponden a fibras de serpentina paralelas unas a otras y perpendiculares a la dirección de propagación de la vena. Las venas de serpentina presentan plegamiento, pinchamiento y desplazamientos lo que indica un componente activo de deformación durante el proceso de alteración. En el proceso de la hidratación de las peridotitas, previo a la generación de las venas, se precipitaron en forma diseminada pequeños cristales de sulfuros de hierro-níquel intercrecidos con óxidos de hierro, a partir de los metales liberados por la alteración de olivinos y piroxenos y un descenso en la fugacidad de oxígeno y azufre (González-Jiménez et al., 2021).

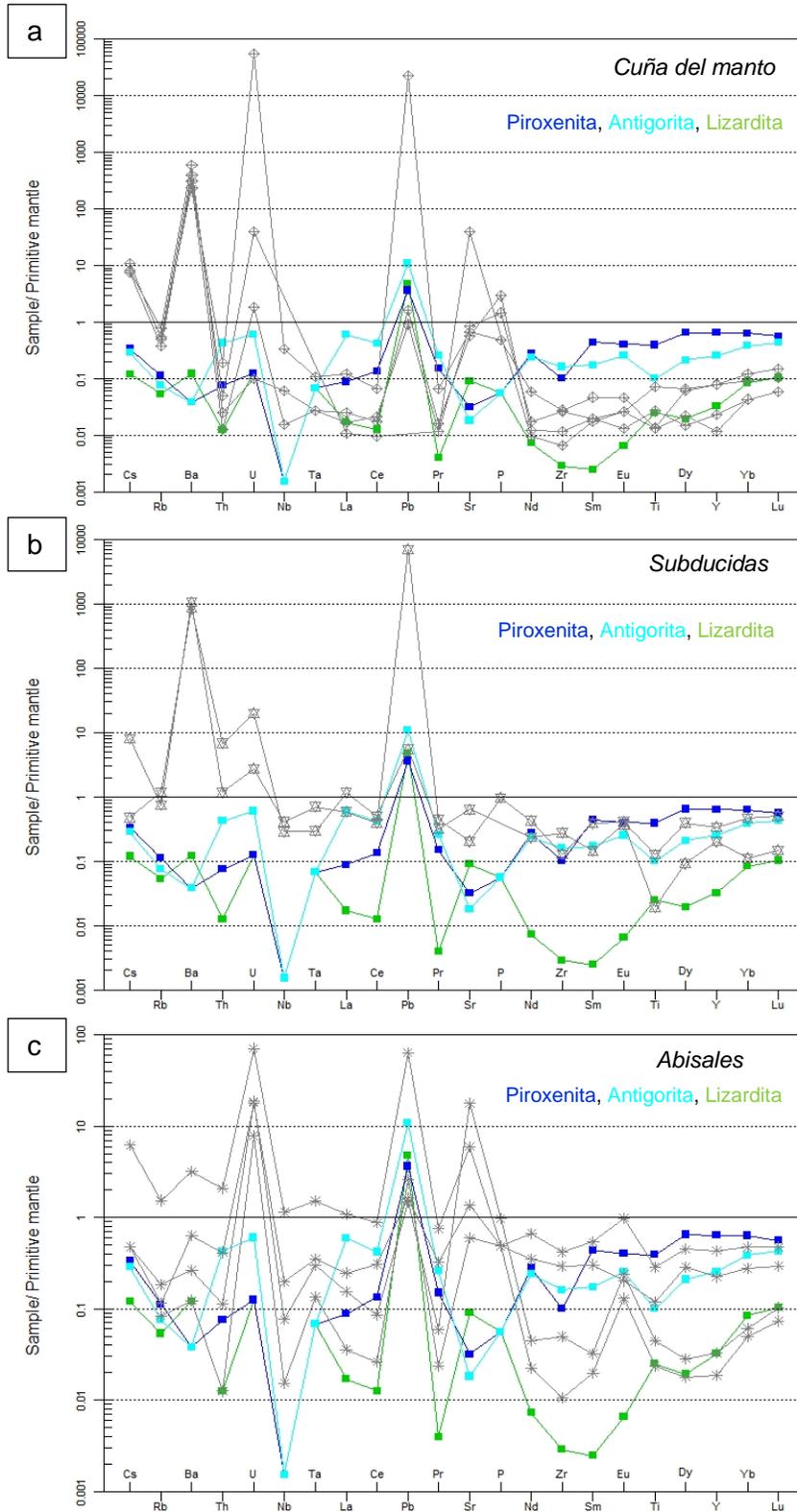
La alteración de intermedia a alta temperatura se caracteriza por presentar una pseudofoliación de las antigoritas-lizarditas, talcos, cloritas y magnetitas y por afectar principalmente los relictos de clinopiroxenos y generar una corona de reacción en las espinelas. La alteración de los diópsidos forma kammererita y en las enstatitas pseudomorfas forma coronas de reacción y texturas interconectadas en las bastitas.

La alteración hidrotermal en las espinelas produce porosidad en el cristal y un borde de magnetita o magnesioferrita. La porosidad aumenta el contenido de hierro y magnesio en la espinela, y la formación del borde de magnetita o magnesioferrita aumenta el contenido de hierro, titanio y manganeso, y disminuye el contenido de cromo y aluminio desde el centro al borde del cristal.

En las coronas de reacción, la espinela porosa presenta una disminución en el contenido de cromo, titanio y manganeso hacia los bordes del cristal mientras que el aluminio y magnesio aumentan en la corona en comparación con el cristal. Las espinelas con borde poroso de magnetita presentan aumento en el contenido de hierro, cromo y manganeso hacia los bordes y disminución de aluminio, mientras que en la corona de reacción se presenta una disminución de aluminio y un aumento en el magnesio, en comparación con el centro del cristal.

En la Figura 5-2 se muestran los diferentes patrones de distribución de elementos para las serpentinitas de la cuña mantélica, subducidas y abisales recopiladas por Deschamps et al. (2012) en comparación con Las Lauras. La distribución de elementos en las rocas estudiadas es muy similar al comportamiento de las serpentinitas abisales de Deschamps et al. (2012) (Figura 5-2c), sin embargo en la parte derecha del gráfico serpentinita dominada por la antigorita muestra un comportamiento más parecido a las serpentinitas subducidas (Figura 5-2b). Esta mezcla de patrones se debe al proceso de rehidratación de la roca con fluidos más calientes que formaron la antigorita.

Figura 5-2: Patrones comparativos entre las serpentinitas de la cuña del manto, subducidas y abisales de Deschamps et al. (2012) en gris, respectos a las serpentinitas de Las Lauras en colores.

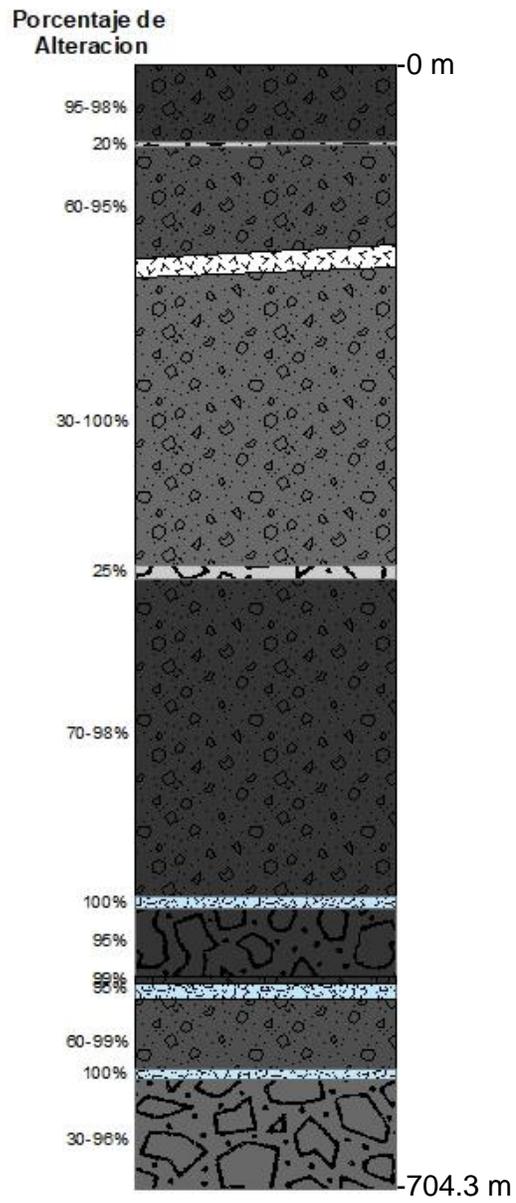


5.1 Implicaciones regionales

La alteración pseudomorfa (lizardita) que presentan las rocas recuperadas del pozo Las Lauras, está relacionada probablemente con la hidratación por agua de mar en una dorsal medio oceánica. La loza fue posteriormente acrecionada al borde noroccidental de Suramericana y en ese proceso se dio una segunda alteración en la roca, denominada no pseudomorfa (antigorita), producto de hidratación con agua de sedimentos al momento de la colisión entre la placa Caribe y la placa Suramericana. La complejidad estructural de la colisión oblicua se ve reflejada en la distribución aleatoria de la intensidad de la alteración así como la variedad de rocas que fueron yuxtapuestas a lo largo del pozo (Figura 5-3).

Figura 5-3: Distribución generalizada de la alteración de las rocas a lo largo del pozo estratigráfico Las Lauras⁶

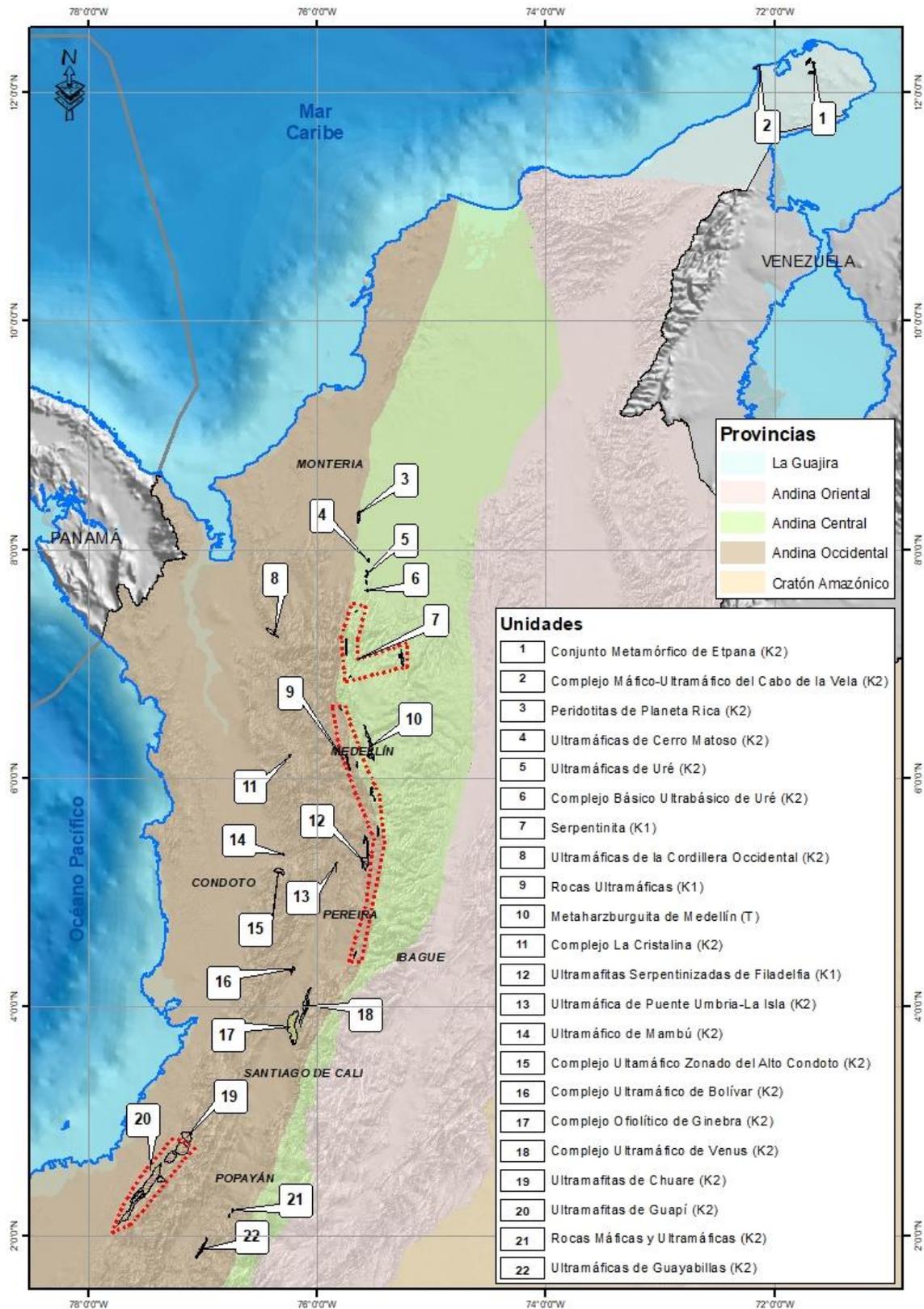
⁶ El achurado de color blanco representa las rodingitas, el achurado color azul claro representa la antigorita de textura pseudomorfa y los demás tonos de grises representan la alteración pseudomorfa de lizardita y crisotilo.



Los cuerpos de rocas ultramáficas que se encuentran a lo largo de la Cordillera Central y Occidental (Figura 5-4), consisten en Dunitas, Harzburgitas, Lherzolitas, Werlitas y piroxenitas serpentinizadas, asociadas con gabros y en contactos fallados con basaltos y lavas (Gonzalez Iregui, 2001; Londoño & González, 1997; Nivia, 2001; Weber et al., 2009). Estos cuerpos hacen parte de complejos ofiolíticos desmembrados, emplazados por medio de fallas profundas de componente inverso (Álvarez, 1989). Las edades establecidas para casi todos los cuerpos ultramáficos es Cretácica, excepto para el Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto que fue datado por Salinas et al. (1994) entre 18.6 y 21.3 m.a. y la Metaharzburguita de Medellín para la cual se propone una edad Triásica (Ibañez-Mejía et al., 2020).

Figura 5-4: Cuerpos de rocas ultramáficas y serpentinitas de la Cordillera Central y Occidental. Modificado de (Gómez Tapias & Montes Ramírez, 2020; Sepúlveda et al., 2020)⁷

⁷ Cuerpos de rocas ultramáficas y serpentinitas cartografiados a escala 1:1 000 000

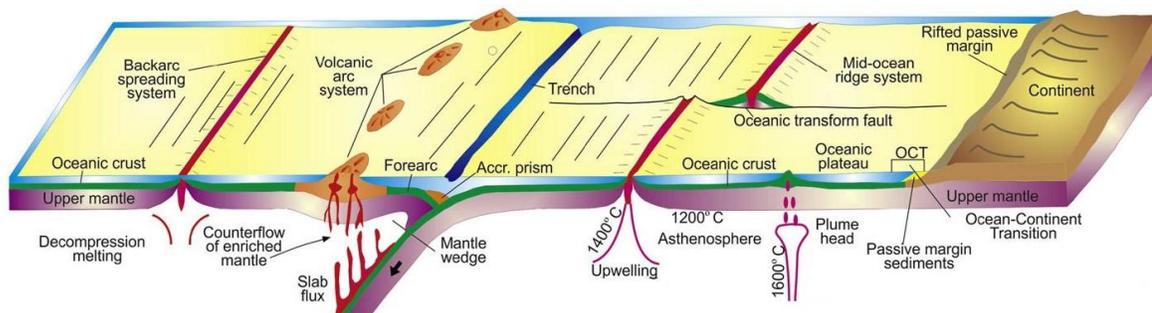


Las rocas ultramáficas en el Conjunto Metamórfico de Etpana y el Complejo Máfico Ultramáfico del Cabo de la Vela presentan características geoquímicas mezcladas de un ambiente tipo MORB y suprasubducción, para las cuales Weber et al. (2009) proponen un arco interoceánico en el pacífico, antes de la colisión entre la placa Caribe y Suramérica.

Para Nivia (2001) las rocas ultramáficas del Complejo Ultramáfico Zonado de Bolívar (CUZB), los Complejos Ofiolíticos de Ginebra, Venus y las rocas volcánicas asociadas, hacen parte de la Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO), que a su vez pertenecen al *Plateau* del Caribe formado en el punto caliente de las Galápagos en una posición más suroccidental de la placa Suramericana, el cual fue emplazado a su posición actual por movimientos NNE hace más de 39 m.a. y en sentido E-W en el intervalo de 39 a 9 m.a. Sin embargo Ossa-Meza & Concha-Perdomo (2007) plantean que el Macizo Ofiolítico de Ginebra (MOG) fue formado en un ambiente de dorsal medio oceánica tipo MORB-N y junto con los basaltos de la Formación Amaime representan una secuencia ofiolítica incompleta, más antigua que el PLOCO, acrecionada al borde noroccidental de la placa suramericana antes que éste. Estudios recientes en el Complejo Ultramáfico Zonado de Bolívar (Medina et al., 2019), definen un ambiente de suprasubducción con generación de boninitas y un ambiente tipo MORB para las ofiolitas del CUZB, la edad obtenida en gabros hornbléndicos para estas rocas es de 95.8 ± 1 m.a.

Según la mezcla de firmas geoquímicas de los cuerpos ultramáficos (arco, MORB-N, suprasubducción, Pluma) en la parte oeste de la Cordillera Central y en la Cordillera Occidental, es posible que la litosfera oceánica se formara como consecuencia de varios centros de expansión (Figura 5-5), que posteriormente se acrecionaron a la parte norte de Suramérica, durante la orogenia Andina.

Figura 5-5: Diagrama esquemático de placas tectónicas, que representa los principales escenarios de construcción magmática de la litosfera oceánica. Modificado de Furnes & Dilek (2017).



Los cuerpos ultramáficos de la Cordillera Occidental y la parte oeste de la Cordillera Central que hacen parte de la corteza oceánica formada por los sucesivos eventos de expansión del fondo oceánico que fueron posteriormente acrecionados a la Corteza Continental de la placa Suramérica por medio de subducción y obducción, generando una complejidad tectónica que superpone rocas máficas y ultramáficas gracias al fallamiento inverso. El basamento de la cuenca Sinú-San Jacinto hace parte de la porción obducida de la corteza oceánica engrosada que colisionó con Suramérica, la cual ha sufrido procesos de erosión en las partes más superficiales generando enriquecimientos supérgenos de lateritas níquelíferas.

6. Conclusiones

Las rocas del pozo estratigráfico Las Lauras son lherzolitas, harzburgitas y piroxenitas con diferentes grados de hidratación, las cuales experimentaron dos procesos de alteración.

En la alteración hidrotermal de baja temperatura se formaron fases minerales como crisotilo, lizardita, magnetita, magnesioferrita y sulfuros de hierro y níquel.

En la alteración hidrotermal de media a alta temperatura se formaron fases minerales como antigorita, Kammererita, clorita y talco.

Intercaladas con las peridotitas se encuentran piroxenitas, con menor grado de serpentización y mayor enriquecimiento de LREE.

En el pozo también se encontraron rocas metasomáticas con textura amigdalal, tipo rodingita, con fases minerales como diópsido, prehnita, talco, epidota y vesuvianita, cortadas por venas de antigorita. Estas rodingitas están estrechamente relacionadas con los fluidos hidrotermales de la serpentización, pero la distribución de elementos traza y REE muestra un origen mucho más enriquecido que la composición del manto primitivo. Sin embargo, se preservaron algunas firmas de los elementos móviles del fluido (FME) similares a las serpentinitas.

Las serpentinitas analizadas muestran características similares a las serpentinitas abisales de todo el mundo, sin embargo la serpentinita dominada por antigorita muestra similitudes también con las serpentinitas subducidas.

Tanto las peridotitas serpentinizadas como las piroxenitas y rodingitas pudieron haberse formado en diferentes centros de expansión de corteza oceánica, los cuales fueron

adosados a Suramérica por medio de subducción y fallas transformantes asociadas a la zona de sutura de Romeral desde el Triásico hasta el Neógeno

Bibliografía

- Álvarez, J. (1989). Mapa metalogénico de las fajas ofiolíticas de la zona de Colombia. *Boletín Geológico*, 30(2), 5–23.
- Ardila, L. E., & Diaz, L. (2015). Terrane Accretion and Transpression Created New Exploration Frontiers in Northwestern South America. *Petroleum Geology and Potential of the Colombian Caribbean Margin*, 108, 217–246. <https://doi.org/10.1306/13531938M1083643>
- Cardona, A., León, S., Jaramillo, J. S., Montes, C., Valencia, V., Vanegas, J., Bustamante, C., & Echeverri, S. (2018). The Paleogene arcs of the northern Andes of Colombia and Panama : Insights on plate kinematic implications from new and existing geochemical , geochronological and isotopic data Tectonophysics The Paleogene arcs of the northern Andes of Colombia and Panam. *Tectonophysics*, 749(November), 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.032>
- Colás, V. (2015). *Modelos de alteración de cromititas ofiolíticas durante el metamorfismo*. Universidad de Zaragoza.
- Deschamps, F., Godard, M., Guillot, S., Chauvel, C., Andreani, M., Hattori, K., Wunder, B., & France, L. (2012). Behavior of fluid-mobile elements in serpentines from abyssal to subduction environments: Examples from Cuba and Dominican Republic. *Chemical Geology*, 312–313, 93–117. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.009>
- Deschamps, F., Godard, M., Guillot, S., & Hattori, K. (2013). Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review. *Lithos*, 178(March 2018), 96–127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.05.019>
- Deschamps, F., Guillot, S., Godard, M., Chauvel, C., Andreani, M., & Hattori, K. (2010). In situ characterization of serpentinites from forearc mantle wedges: Timing of serpentinization and behavior of fluid-mobile elements in subduction zones. *Chemical Geology*, 269(3–4), 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.10.002>
- Duque-caro, H. (1984). Structural style, diapirism, and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland. *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*, 162, 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/MEM162-p303>
- Flinch, J. F. (2003). Structural Evolution of the Sinu-Lower Magdalena Area (Northern Colombia). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics*, 79(Figure 1), 776–796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1306/M79877C35>

- Furnes, H., & Dilek, Y. (2017). Geochemical characterization and petrogenesis of intermediate to silicic rocks in ophiolites: A global synthesis. *Earth-Science Reviews*, 166, 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.001>
- Gómez Tapias, J., & Montes Ramírez, N. E. (2020). *Mapa Geológico de Colombia 2020, Escala 1:1 000 000* (p. 2). Servicio Geológico Colombiano.
- González-Jiménez, J. M., Piña, R., Saunders, J. E., Plissart, G., Marchesi, C., Padrón-Navarta, J. A., Ramón-Fernandez, M., Garrido, L. N. F., & Gervilla, F. (2021). Trace element fingerprints of Ni–Fe–S–As minerals in subduction channel serpentinites. *Lithos*, 400–401. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106432>
- Gonzalez Iregui, H. (2001). *Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Geología, Recursos Minerales y Amenazas Potenciales. Escala 1:400.000, Memoria Explicativa*.
- Guillot, S., Schwartz, S., Reynard, B., Agard, P., & Prigent, C. (2015). Tectonic significance of serpentinites. *Tectonophysics*, 646, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.020>
- Ibañez-Mejía, M., Restrepo, J. J., & García-Casco, A. (2020). Tectonic juxtaposition of Triassic and Cretaceous meta-(ultra)mafic complexes in the Central Cordillera of Colombia (Medellin area) revealed by zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes. In C. Cornejo (Ed.), *Geocronología e Evolução Tectônica do Continente Sul-Americano: a contribuição de Umberto Giuseppe Cordani* (1a ed., p. 27). Solaris Edições e Produções Culturais e Multimídia Ltda. <http://hdl.handle.net/10261/235545>
- Lara, M., Cardona, A., Monsalve, G., Yarce, J., Montes, C., Valencia, V., Weber, M., Parra, F. D. La, Espitia, D., & López-Martínez, M. (2013). Journal of South American Earth Sciences Middle Miocene near trench volcanism in northern Colombia : A record of slab tearing due to the simultaneous subduction of the Caribbean Plate under South and Central America ? *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 24–41. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.12.006>
- Londoño, A. C., & González, H. (1997). Geología del departamento de Córdoba. Mapa Escala 1:250.000. In *Ingeominas* (p. 560).
- Mantilla, A. M. (2007). *CRUSTAL STRUCTURE OF THE SOUTHWESTERN COLOMBIAN CARIBBEAN*. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Medina, J., Martínez, A., Molano, J. C., Rodríguez, B. P., & Guerrero, N. (2019). Petrogénesis de las rocas máficas y ultramáficas del complejo ultramáfico zonado de Bolívar basado en microquímica de cromo-spinelas. *XVII Congreso Colombiano de Geología*, 4.
- Mora, J. A. (2018). *Upper Cretaceous to Recent plate tectonics , basin formation and tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena valley and San Jacinto fold belt of Northwestern Colombia : implications for hydrocarbon systems*. Freien Universität Berlin.
- Nivia, Á. (2001). *Mapa Geológico del Departamento del Valle del Cauca. Escala 1:250.000, Memoria Explicativa*.
- Ossa-Meza, C. A., & Concha-Perdomo, A. E. (2007). Petrogénesis de las rocas del

- Macizo Ofiolítico de Ginebra entre las veredas La Honda (Ginebra) y El Diamante (Buga) en el departamento del Valle del Cauca. *Geología Colombia*, 32(32), 97–110.
- Salinas, R., Tistl, M., & Burgath, K. (1994). *Geología, Mineralogía y Química del Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto (CUZAC)*.
- Sepúlveda, J., Celada Arango, C. M., Gómez, M., Prieto, D., Murillo, H., Rodríguez, A., Rache, A., Jiménez, C., Velásquez, L., Luengas, C., Torres, C., García, D., Prieto, G., Peña, L., Leal-Mejía, H., & Hart, C. J. R. (2020). *Mapa Metalogénico de Colombia, Escala 1:1 500 000* (p. 1). Servicio Geológico Colombiano.
- Toussaint, J.-F., & Restrepo, J. J. (2020). Tectonostratigraphic Terranes in Colombia: An Update Second Part: Oceanic Terranes. In *The Geology of Colombia* (Publicación, Vol. 2, pp. 247–510). Servicio Geológico Colombiano.
<https://doi.org/https://doi.org/10.32685/pub.esp.36>
- W. A. Deer, R. A. H. and J. Z. (1992). *W. A. Deer, R. A. Howie and J. Zussman An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 2nd edition. London (Longman Scientific & Technical), 1992. xvi + 696 pp. Price £21.99 (2nd ed.)*. Library of congress cataloging-in-publication data. <http://www.pearsoned.co.uk>
- Weber, M. B. I., Cardona, A., Paniagua, F., Cordani, U., Sepúlveda, L., & Wilson, R. (2009). The Cabo de la Vela Mafic-Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: A record of multistage evolution of a Late Cretaceous intra-oceanic arc. *Geological Society Special Publication*, 328, 549–568.
<https://doi.org/10.1144/SP328.22>
- Wicks, F. J. (1977). Serpentine textures and serpentinization. *Canadian Mineralogist*, 15, 459–488.