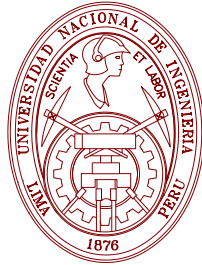


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA**



**GEOLOGÍA, PETROGRAFÍA Y MINERALOGÍA  
DEL YACIMIENTO DE CROMITA DE TAPO  
TARMA - PERÚ**

***TESIS***

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR:**

**ROBERT VICTOR EDUARDO URIBE ORMEÑO**

**ASESOR:**

**DR. ING. EITEL ROLANDO CARRASCAL MIRANDA**

**LIMA - PERÚ**

**2012**

Dedico mi esfuerzo en este trabajo:

A Roberto, mi padre quien con su amor al trabajo y ejemplo como progenitor, sembró en mi, la curiosidad por las ciencias y la naturaleza.

A Marta, mi madre por su amor, dedicación y abnegación, en los momentos más difíciles de mi vida.

A la memoria de mis queridos abuelos Eduardo y Juana, junto con Víctor y Angélica; quienes ya forman parte de la eternidad, agradeciéndoles por los padres que tengo.

A Gricelda, mi paciente y adorada compañera de toda la vida, por su amor y comprensión.

A Robertito, quien a su corta edad es mi alegría y la razón de mi lucha diaria.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de una u otra manera me han prestado su apoyo para la realización de este trabajo.

Mi mayor agradecimiento al Dr. Rolando Carrascal, quien me brindó su confianza para la ejecución de este proyecto y sin cuyo valioso asesoramiento, continua orientación; además, de su gratificante insistencia y estímulo; no hubiera sido posible, llevar el trabajo a un feliz término.

Un agradecimiento muy especial a la RED DESIR (Desarrollo Sostenible – Ingeniería – Recursos Naturales), en la persona del Dr. Ricardo Castroviejo, por el financiamiento económico de las salidas al campo, además de permitirme participar en las salidas de prácticas, conjuntamente con los alumnos del Programa Internacional Máster en Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, brindándome de esta manera, la oportunidad de participar de una serie de clases magistrales al aire libre, las cuales fueron muy importantes para la comprensión de este yacimiento. Además por compartir parte de los resultados obtenidos, en sus estudios particulares de las muestras de Tapo, enviadas a la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

De igual manera, mi gratitud al Ms.Sc. José Feliciano Rodríguez, quien mediante sus clases en la Maestría y su participación en las excursiones al campo, me ayudó a comprender mejor las relaciones estructurales que originaron este yacimiento. También quiero agradecer a los ingenieros Jorge Acosta, Darwin Romero y Jorge Quispe, geólogos de INGEMMET, por su participación en el desarrollo de las labores de campo.

Mi especial consideración a la empresa Refractarios Peruanos S.A. (REPSA), en la persona del Ing. Luis Quiroz, por su apoyo en el financiamiento, para la preparación de las muestras de secciones delgadas y pulidas, a ser estudiadas en el microscopio de polarización.

Mi gratitud a los ingenieros Hernán Hernández y Maritza Campián por su invaluable ayuda, con sus conocimientos previos de la zona y en lo que respecta a su asistencia en los trabajos de campo, además; por el apoyo incondicional brindado en

las labores de gabinete. Al Ms.Sc. Atilio Mendoza, por su apoyo desinteresado en el estudio de muestras mediante el análisis químico, análisis espectrográfico y también por el método de difracción de rayos X. Al Ing. José Martínez, por ayudarme a esclarecer muchas inquietudes con respecto a la estratigrafía del lugar. Al Ing. Jorge Guizado, por sus sugerencias en el estudio de las muestras de Tapo. Al Ing. Alfonso Huamán, por los alcances recibidos de trabajos anteriores efectuados por él, en zonas circundantes al área de estudio.

Deseo brindar mi especial gratitud a mis grandes amigos de toda la vida, ingenieros Laura Plasencia y Gustavo Vélez por brindarme todo el apoyo moral necesario; el cual fue muy importante en los momentos más difíciles en el desarrollo de esta tesis. A mis compañeros de trabajo en el Laboratorio de Mineralogía, ingenieros Marcelo Barzola, César Mendoza, Carlos Rojas y Roberto Visurraga, quienes me apoyaron en mis labores en la universidad, cubriendo mis horas de dictado de clases, mientras me encontraba en el campo.

También debo agradecer, a los ex-alumnos Luís Calle por su ayuda en los trabajos de campo y en la recolección de las muestras y a José Macedo, por su apoyo en la preparación de todos los planos.

Finalmente es mi deseo brindar mi eterna gratitud, a todas aquellas personas que de una forma u otra y que deseando encontrarse en el anonimato, me respaldaron, apoyaron y me brindaron mucho más que su amistad, para poder concluir con este trabajo.

“No hay más que una manera de evitar los errores: no hacer nada o, al menos, evitar hacer algo nuevo. Este, sin embargo, en sí mismo, puede ser el mayor error de todos.”

*Alber Szent-Györgyi*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
1.1    Introducción .....	2
1.2    Trabajos Previos .....	6
1.3    Planteamiento del Estudio .....	11
1.4    Objetivos y Alcances del Estudio .....	11
1.5    Metodología de Trabajo .....	12
<b>2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL .....</b>	<b>14</b>
2.1    Ubicación y Acceso .....	14
2.2    Rasgos Geomorfológicos .....	14
2.3    Estratigrafía .....	19
2.3.1    Pre-Cámbrico .....	19
2.3.2    Paleozoico Superior .....	21
2.3.3    Mesozoico Inferior .....	27
2.3.4    Cenozoico .....	29
2.4    Tectónica .....	30
<b>3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO .....</b>	<b>34</b>
3.1    Estratigrafía .....	34
3.1.1    Ubicación de los Cuerpos Minerales .....	39
3.2    Estructural .....	43
<b>4. CARACTERÍSTICAS DE LA MINERALIZACIÓN .....</b>	<b>45</b>
4.1    Geometría de los Cuerpos .....	45
4.2    Distribución de los cuerpos .....	48
4.3    Petrografía y Mineralogía .....	56
4.4    Distribución de Cr – Ni .....	60

<b>5. ESTUDIOS PETROGRÁFICOS Y MINERAGRÁFICOS ..</b>	<b>64</b>
5.1 Descripción Macroscópica .....	64
5.2 Identificación Microscópica de las Menas y Gangas .....	79
5.3 Identificación de las Asociaciones y Texturas .....	106
5.4 Paragénesis y Secuencia Paragenética .....	110
5.5 Identificación Microscópica de las Rocas Cajas .....	111
5.6 Identificación de las Asociaciones de alteración .....	129
5.7 Análisis Químicos Complementarios .....	131
<b>6. INTERPRETACIÓN, DISCUSIÓN Y ESBOZO PRELIMINAR DEL TIPO DE YACIMIENTO .....</b>	<b>141</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>146</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>150</b>
<b>REFERENCIAS ELECTRÓNICAS .....</b>	<b>155</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA .....</b>	<b>156</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>TABLAS, FIGURAS Y PLANOS</b>	
<b>Tabla 1.1: Clases de Menas .....</b>	<b>3</b>
<b>Tabla 1.2: Especificaciones de las Cromitas según el Uso Industrial .....</b>	<b>3</b>
<b>Tabla 1.3: Producción Mundial de Cromita .....</b>	<b>5</b>
<b>Plano 2.1: Ubicación y Acceso a Mina San Felipe. Tapo - Tarma .....</b>	<b>15</b>
<b>Plano 2.2: Plano Geológico Regional. Tapo - Tarma .....</b>	<b>22</b>

<b>Figura 2.1:</b> Macizos precambrianos y afloramientos de rocas ultrabásicas, en el extremo Sur-Este del Macizo de Chupán-Huasahuasi .....	32
<b>Plano 3.1:</b> Plano Geológico Local. Mina San Felipe. Tapo - Tarma .....	41
<b>Plano 3.2:</b> Franjas Mineralizadas Mina San Felipe. Tapo - Tarma .....	42
<b>Plano 4.2:</b> Plano de Distribución de Isovalores de Níquel. Mina San Felipe. Tapo - Tarma .....	63



## RESUMEN

En las alturas del poblado de Tapo (Tarma - Junín), se encuentra emplazado un cuerpo de naturaleza ultramáfica, formado posiblemente por peridotitas y dunitas totalmente serpentinizados, el cual presenta una mineralización de cromita.

Aún no se conoce con certeza el origen del emplazamiento de este cuerpo, pero es bastante probable que se trate de un cuerpo alóctono, el cual se encuentra en contacto tectónico en todo su límite externo con las unidades sedimentarias y volcánicas del Grupo Ambo.

Las serpentinitas presentan una fuerte esquistosidad penetrativa con dirección NW-SE. Fueron clasificadas de manera muy general como serpentinita gris verdosa, serpentinita verde amarillenta y serpentinita verde botella, todas presentan características mineralógicas bastante similares, pero difieren bastante en sus rasgos texturales macroscópicas. La cromita se encuentra en forma masiva formando cuerpos con formas nodulares de dimensiones centimétricas a métricas y también como cromititas compuestas por fragmentos finos de cromita en matriz serpentínica. La roca encajonante serpentinizada, fue cortada por cuerpos de anfibolitas, concordantes con la dirección de la esquistosidad, los cuales en algunas zonas conservan aún, características del protolito de tipo gabroico.

También se presentan ocurrencias de ferritrocromita, magnetita, ilmenita, titanita (esfena) y sulfuros como piritita, pirrotita, pentlandita, entre otros. Se presentan ciertas ocurrencias poco comunes de minerales producto de la alteración de las cromitas, como es el caso de la stichtita, además por difracción de rayos X se ha comprobado la existencia de nimita (cloritas ricas en níquel).

El origen del yacimiento se considera debido a procesos de segregación magmática, producto de la cristalización fraccionada del magma.

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 Introducción**

A mediados de los años 80' y especialmente en la década de los 90' se produjo en el país, el llamado "Boom de las Exploraciones", dando énfasis a la búsqueda de yacimientos metálicos de minerales preciosos, principalmente los relacionados con las alteraciones hidrotermales. En menor medida, se realizaron trabajos de exploración en yacimientos de minerales industriales no metálicos, tales como fosfatos, arcillas, sulfatos entre otros; además de rocas ornamentales, etc. con relativo éxito. La cromita se ubica dentro de este grupo, siendo la única mena de cromo; es un mineral útil en la industria química, metalúrgica y también siderúrgica, donde se emplea tanto como revestimientos para galvanizado (cromado), fabricación de aceros inoxidables y así mismo, como material refractario. Para estos fines se emplean los minerales de menor riqueza, con 40 % a 43 % de óxido de cromo (Tabla 1.1 y 1.2).

El yacimiento de Tapo constituye el único depósito de cromita conocido en el Perú desde mediados de los años 50', siendo económicamente explotado a inicios de los 90'. A través de los años, se han realizado diversos estudios para conocer la naturaleza y el volumen del yacimiento. Refractarios Peruanos S.A., actual titular de las concesiones de cromita más conocidas como "Mina San Felipe", ha utilizado el material explotado para la fabricación de sus productos refractarios como ladrillos, morteros, castables (concretos u hormigones de fragua hidráulica), etc.

El presente trabajo pretende brindar un conocimiento del contexto geológico del yacimiento, tratando principalmente de caracterizar las rocas y minerales presentes, para luego proponer un modelo que permita la explicación del ambiente de formación, lo cual conduciría a una mejor explotación del recurso y por consiguiente un mayor rendimiento económico.

Durante los trabajos de campo, se han tomado una serie de muestras representativas, tanto de las labores de extracción como de los afloramientos de superficie; cuyas ubicaciones se encuentran localizadas en el plano geológico respectivo. Dichas muestras fueron estudiadas y evaluadas bajo diferentes métodos, desde análisis químicos, análisis espectrográfico multielemental, difracción de rayos X, además

**Tabla 1.1.- CLASES DE MENAS**

(Según B.R. Lipin y T.P. Thayer, 1978) Fuente: Vásquez, (1996)

Clase	Composición en peso	Depósito	Usos
Alta en Cr	46 – 55 % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Cr/Fe > 2	Estratiforme, Podiforme	Metalúrgico
Alta en Fe	42 – 46 % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Cr/Fe < 2	Estratiforme	Metalúrgico, Químico
Alta en Al	33 – 38 % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 22 – 34 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Podiforme	Refractario

**Tabla 1.2.- ESPECIFICACIONES DE LAS CROMITAS SEGÚN EL USO INDUSTRIAL**

(Modificado de Evans, 1987) Fuente: Lunar, R. & Oyarzún R. (1991)

Uso	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr/Fe	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>
Metalúrgico	>48	>1,5	–	–	–
Químico	>45	–	–	–	<8
Refractario	>30	–	>57	<10	<5

de microscopía de polarización, entre otros; con la finalidad de reconocer y caracterizar la mineralogía y petrografía de la zona de estudio.

Hay que señalar que la presente tesis está basada en parte en los resultados obtenidos en dos proyectos de investigación donde tuve una activa participación, una es un proyecto conjunto de investigación entre la Universidad Politécnica de Madrid (UPM - España) y la Universidad Nacional de Ingeniería (Escuela de Geología - Gabinete de Yacimientos Minerales) realizada en el 2006 y el segundo proyecto de investigación de la FIGMM - Escuela de Geología - UNI, efectuado el 2007, ambos relacionados al yacimiento de Tapo.

Asimismo fruto de dichas investigaciones se tienen algunas publicaciones realizadas para revistas científicas extranjeras y nacionales, los cuales se adjuntan en la sección de anexos.

En otro contexto, se conoce que Sudáfrica posee la supremacía en la producción mundial de cromita, debido a lo imponente de sus yacimientos (Bushveld), considerados la principal reserva mundial de cromo en el mundo y una importante fuente de suministro de hierro-vanadio y metales del grupo del platino. Países como Kazajstán, India, Turquía e incluso Finlandia; no dejan de ser importantes con su aporte a la producción mundial de cromo. En Latinoamérica, destacan Brasil y Cuba como los principales productores de cromita en la región (Tabla 1.3).

Se debe tener en cuenta, que a nivel mundial y específicamente a partir de 1994, el consumo de cromita refractaria creció como consecuencia del aumento de producción de aceros inoxidable y refractarios. Por el contrario, el consumo de cromita refractaria y para fundición, disminuye debido principalmente, al reemplazo de la magnesita-cromita por magnesita-grafito y magnesita-alúmina, con mayores precios de costo; pero, con más altas prestaciones.

Se considera que en el futuro, la demanda de cromo se mantendrá en los altos niveles actuales, al no existir ningún metal que pueda sustituirlo en la fabricación de aceros especiales, necesarios en los diversos campos de la industria y en aplicaciones especiales (*Vázquez, 1996*).

**Tabla 1.3.- PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CROMITA**

(En toneladas de mineral)

	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Albania</b>	187,070	194,760	220,536	288,759	289,687
<b>Finlandia</b>	549,000	556,000	614,000	247,000	598,000
<b>Kosovo</b>	-	-	-	2,000	...
<b>Rusia</b>	966,095	776,681	913,000	416,194	...
<b>Turquía</b>	1'059,901	1'678,932	1'885,712	1'770,029	1'904,460
<b>Madagascar</b>	116,290	77,700	112,600	131,800	134,500
<b>Sudáfrica</b>	7'418,326	9'646,958	9'682,640	6'864,938	10'871,095
<b>Sudán</b>	24,200	37,656	27,094	14,087	56,823
<b>Zimbabwe</b>	700,001	614,559	442,584	193,674	510,424
<b>Cuba</b>	5,047	-	-	-	-
<b>Brasil</b>	562,739	627,772	705,726	*700,000	*700,000
<b>Afganistán</b>	7,273	6,491	6,491	6,000	*6,000
<b>China</b>	220,000	220,000	220,000	*220,000	*220,000
<b>India (a)</b>	5'295,551	4'872,847	4'073,479	3'412,867	4'262,207
<b>Irán (b) (c)</b>	236,397	139,114	268,586	274,511	*275,000
<b>Kazajstán</b>	3'366,078	3'687,200	3'551,700	8'059,000	8'594,000
<b>Omán</b>	276,300	407,800	784,100	636,500	*640,000
<b>Pakistán (d)</b>	64,572	104,141	114,884	89,739	257,148
<b>Filipinas (b)</b>	46,728	31,593	15,268	14,322	14,807
<b>Emiratos Árabes Unidos</b>	-	19,000	34,350	23,770	...
<b>Vietnam</b>	3,400	2,800	*1,300	*400	...
<b>Australia</b>	107,103	118,093	56,881	72,813	73,618
<b>Producción mundial</b>	<b>21'200,000</b>	<b>23'800,000</b>	<b>23'700,000</b>	<b>23'400,000</b>	<b>30'000,000</b>

**Notas:**

- (1) Además de los países antes mencionados, se cree que Bulgaria también produce cromita.
- (a) Año terminado al 31 de Marzo siguiente al declarado.
- (b) Incluido arena de fundición y/o material grueso.
- (c) Año terminado al 20 de Marzo siguiente al declarado.
- (d) Año terminado al 30 de Junio del declarado.

**Fuente:** World Mineral Production 2006-2010; Autores: Brown, T.; Walters, A.; Idoine, N.; Shaw, R.; Wrighton, C. & Bide T. British Geological Survey 2012.

## 1.2 Trabajos Previos

Se mencionan los siguientes:

*J.V. Harrison*; quien en el año de 1939, fue el primero en visitar el área y preparar un mapa geológico, delimitando correctamente el cuerpo de rocas ultrabásicas y las calizas de lo que entonces llamó formación Pariatambo (estudios posteriores efectuados por *Mégard* en 1968, redefinió a esta área como parte de la formación Chambará). En dicho trabajo, no hizo mención alguna de la mina ni tampoco del mineral; desconociéndose si es que no lo halló o no quiso mencionarlo en su reporte (*Harrison*, 1943).

*Fernando De Las Casas*; fue el primero en reportar la ocurrencia de cromita, para la empresa “Consolidated Guayana Mines”, para esto recopiló una serie de muestras que fueron estudiadas en el antiguo Laboratorio de Mineralogía de la Universidad Nacional de Ingeniería; además trabajó en la elaboración de un mapa geológico del área de interés a escala 1:2500 y un mapa geológico generalizado 1:25000. Aunque se desconoce el año exacto, es posible que se haya realizado entre los años 1955 y 1957.

*Mariano Iberico* (1958), quien al final de sus trabajos, realizó un reporte para la compañía “Cerro de Pasco Corporation”, sobre la geología de la mina San Felipe (Fotos 1 y 2).

*H.D. Lunceford* (1965), en Julio de 1965, visitó la zona, a pedido de “Refractarios Peruanos S.A.” con el propósito de evaluar la importancia y el potencial del depósito; además realizar trabajos de exploración en los alrededores, necesarios para una evaluación más precisa del yacimiento.

*Robert Zeller*; realizó un detallado estudio de la zona, a fines de 1965 y principios de 1966, cuyos objetivos fueron efectuar la exploración para cuantificar la presencia de cromita, el reconocimiento de las áreas aledañas en búsqueda de otros depósitos potenciales y finalmente la búsqueda de magnesita asociada mayormente a rocas serpentinizadas (*Zeller*, 1966).

*Hernán Hernández*; efectuó entre fines de 1990 e inicios de 1991, un estudio geológico detallado, a escala 1:2000 del área de interés, permitiendo ubicar en la

labor Tomasa, 500 toneladas de mineral probado y 500 toneladas de mineral probable. Adicionalmente se ubicaron zonas que reportaron valores importantes, dando como resultado una continua explotación desde fines del año 1991 hasta 1997, con una producción total aproximada a las 4000 toneladas de cromita (*Hernández, 1991 y 2005*). Desde esa fecha la mina se encuentra totalmente paralizada (Fotos 3 y 4).

En 1992, el autor de esta tesis realizó sus practicas pre-profesionales en la empresa Refractarios Peruanos S.A., preparando un informe de actividades basados en los conocimientos adquiridos sobre el yacimiento de cromita de Tapo, siendo presentada a la Universidad Nacional de Ingeniería como requisito indispensable para la obtención del grado académico de Bachiller en Ingeniería Geológica.

*Ricardo Castroviejo (UPM), Rolando Carrascal y Robert Uribe (UNI)*, efectuaron trabajos en el año 2006 para el proyecto internacional “Investigación Geológico-Minera del Complejo Ultramáfico de Tapo y de su Potencial como Metalotecto de Cr, Ni, Cu, Au y EGP (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Os)”.

*Rolando Carrascal, Robert Uribe, José Macedo y Pedro Cerrón (2007)*, realizaron estudios sobre la petrología, distribución y génesis de las ocurrencias de cromo y níquel en Tapo - Tarma; para el proyecto de investigación de la FIGMM - Escuela de Geología (UNI).

Sobre trabajos regionales que cubren el área de interés, destaca el efectuado por *François Mégard*; en su estudio “Geología de Los Andes del Perú Central”, realizado en 1979, menciona la presencia de la peridotita de Tapo, así como la ocurrencia de las mismas rocas en otras dos áreas cercanas a la localidad de Huasahuasi.



**Foto 1.-** Vistas antiguas de un importante afloramiento de cromita, visible en la superficie (Tomado de *Iberico*, 1958).



**Foto 2.-** Afloramientos de cromita, algo más pequeños (Tomado de *Iberico*, 1958).

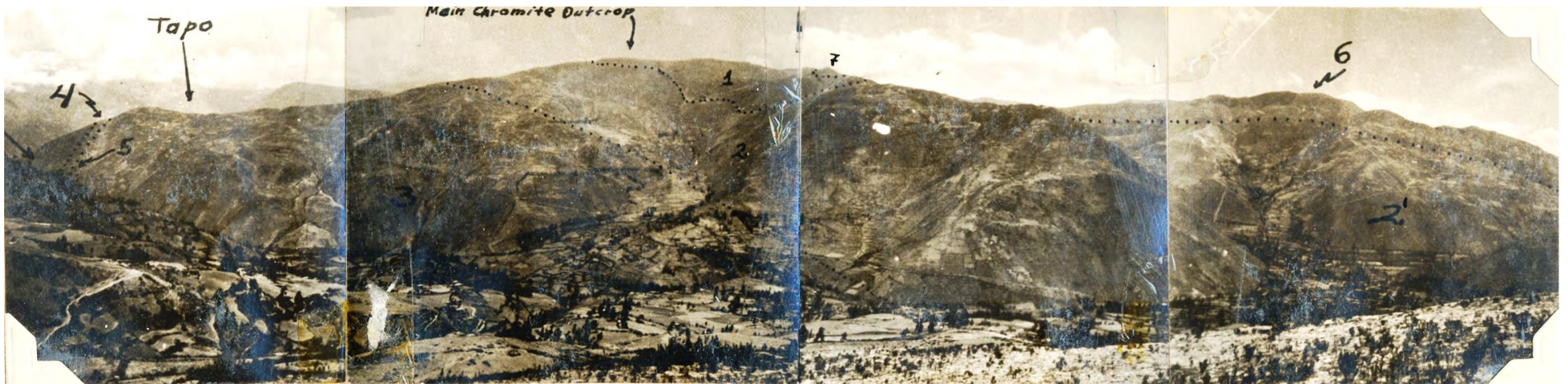




**Foto 3.-** En 1991, se reinició nuevamente las labores en la mina, con la construcción de trincheras y medias barretas con el propósito de reconocer nuevos cuerpos de cromita (Tomado de *Medrano*, 1992).



**Foto 4.-** Labor Tomasa, donde se muestra un cuerpo de cromita de apreciables dimensiones (Tomado de *Medrano*, 1992).



**Foto 5.-** Antigua fotografía panorámica del yacimiento en los años 50, visto de Norte a Sur. (Tomado de *Iberico*, 1958).



**Foto 6.-** Vista panorámica actual del yacimiento (Junio 2007).

### **1.3 Planteamiento del Estudio**

En nuestro territorio existe una diversidad de yacimientos de minerales metálicos, basados esencialmente en la alteración de las rocas preexistentes. En este caso, se presenta el reto de estudiar un yacimiento con poca presencia en la geología del país. El área de estudio, se evalúa como yacimiento de inyección magmática ultrabásica, en la cual la alteración de la roca caja no es de naturaleza hidrotermal coetánea; sino más bien, producto del metamorfismo de rocas ultramáficas.

Como paso inicial se ha previsto la identificación, el reconocimiento y delimitación de los principales cuerpos ultramáficos; tomando en cuenta sus relaciones de campo, para luego proceder al estudio de detalle. Ha sido fundamental la toma selectiva de muestras, en las labores y afloramientos más representativos.

Producto de la exploración del área de trabajo, se obtuvo la información necesaria, que permitirá desarrollar los aspectos considerados en el presente estudio.

### **1.4 Objetivos y Alcances del Estudio**

Realizar el estudio geológico, con el fin de conocer la naturaleza y las características de un yacimiento de segregación magmática, con mineralización de cromo y níquel; elementos que hasta hace muy poco tiempo se consideraba de bajo rendimiento económico, debido a la escasa presencia reportada en nuestro territorio.

A continuación se detallan las acciones a realizar:

- Determinar la ocurrencia, forma de emplazamiento y relaciones geológicas de los cuerpos mineralizados con la roca encajonante.
- Caracterizar dichos cuerpos mineralizados desde el punto de vista geológico, petrográfico y mineragráfico, teniendo en cuenta lo particular del yacimiento.
- Analizar su origen, particularmente desde el punto de vista del mecanismo de emplazamiento y de su posible identificación como cuerpos ofiolíticos o escamas mantélicas.

## 1.5 Metodología de Trabajo

Inicialmente consistió en una exhaustiva investigación bibliográfica, básicamente de ocurrencias estudiadas en el extranjero; dado que en el Perú no se tienen reportes de otros yacimientos con estas características, dichos conocimientos, se relacionaron con los distintos aspectos del tema, para así comparar y reconocer ambientes geológicos, formas de emplazamiento, técnicas de prospección y de tratamientos favorables, adecuados para la realización del trabajo.

Han surgido diferentes hipótesis, que tratan de explicar el origen de las peridotitas que albergan la mineralización de cromita en Tapo; tales como el emplazamiento de sills interestratificados o de lacolitos a partir de la intrusión de un magma ultrabásico profundo (*Grandin et al.*, 1977), o también como la del emplazamiento a manera de un diapiro, aprovechando zonas de debilitamiento (*Mégard*, 1979) y finalmente debido a la presencia de una deformación interna dúctil, relacionada con un ámbito de manto profundo (*Castroviejo*, 2006). Lo expuesto anteriormente sirvió como punto de partida para el estudio de los procesos de formación del yacimiento.

Posteriormente el trabajo de campo ha consistido en:

- Reconocimiento de campo, visitando la zona mineralizada y los alrededores, donde se tiene información de la ocurrencia de este tipo de rocas, en la cual Refractarios Peruanos S.A. (REPSA), extraía hasta el año 1997 cromita en afloramientos y también como rodados de este mineral.
- Preparación del plano geológico local a escala 1/25000, mostrando las diversas litologías y determinando la geometría de los principales cuerpos de cromita.
- Toma de muestras, del mineral de mena y de la roca caja, para su análisis químicos, mineralógicos y petrográficos. Dicho desmuestre fue realizado principalmente en las labores más importantes y con mayor presencia de mineral; así como también, en los afloramientos cercanos más representativos.
- Selección de muestras representativas para la preparación y posterior realización de los respectivos estudios en el laboratorio; macroscópicos y microscópicos mediante el uso de equipo especializado (microscopios estereoscópicos, de polarización; difractómetros de rayos X, etc.).

- Reevaluación de las hipótesis iniciales, formulación del escenario a discutir, interpretación de la información obtenida y procesada, validación del modelo propuesto y finalmente la presentación de la nueva propuesta.

## **2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

### **2.1 Ubicación y Acceso**

El yacimiento de cromita de Tapo, también conocido como “Mina San Felipe”, se encuentra situado en el distrito de Tapo, ubicándose en las alturas de los pueblos de Huaylahuichán y Tapo, jurisdicción de la provincia de Tarma, departamento de Junín, a una altura superior a los 4100 m.s.n.m. (Plano 2.1 y Foto 7).

Es accesible desde Lima, por la siguiente ruta:

Partiendo de Lima hasta la ciudad de Tarma, recorriendo una distancia de 231 km en aproximadamente 6 horas; a través de una carretera totalmente asfaltada. Desde Tarma y en un corto recorrido de 15 km, sobre la carretera asfaltada Tarma – La Merced, hasta el desvío que asciende al poblado de Huaylahuichán, y a partir de allí, se continúa a través de una estrecha y zigzagueante trocha carrozable de 12 km, hasta llegar a las labores mineras de San Felipe. Este recorrido se realiza en aproximadamente 2 horas, debido principalmente a las malas condiciones actuales de esta trocha (Plano 2.1).

Continuando por la carretera Tarma – La Merced; se encuentra además, otro acceso alternativo a la zona de trabajo, el cual se presenta como un desvío a la salida del distrito de Palca. Consta de una carretera afirmada que se dirige al distrito de Tapo; una vez llegado al pueblo, se corta por un camino que cruza al río del mismo nombre, continuándose por esta ruta hasta llegar a un cruce que enlaza a la trocha carrozable anteriormente descrita. Debido a la mayor distancia recorrida, dicho trayecto sólo es usado en caso de interrupción del primer recorrido (Plano 2.1).

### **2.2 Rasgos Geomorfológicos**

El área forma parte de la Cordillera Oriental de Los Andes, donde destacan los macizos montañosos aislados unos de otros, por valles angostos, encañonados y de mucha pendiente entre los 3000 y 1000 m de altitud (Fotos 7 y 8). Estos valles se muestran profundos y de corta extensión.



**Foto 7.-** Vista del pueblo de Tapo en un valle angosto y de corta extensión, asentado en ambas márgenes del río del mismo nombre.



**Foto 8.-** Vista de las labores actualmente abandonadas de la mina San Felipe (Tomada desde el Norte).

Por sobre los 3000 m.s.n.m. y más aún sobre 4000 m.s.n.m. se observa una superficie algo más suave y ondulada, producto de la última actividad glaciar (Foto 9).

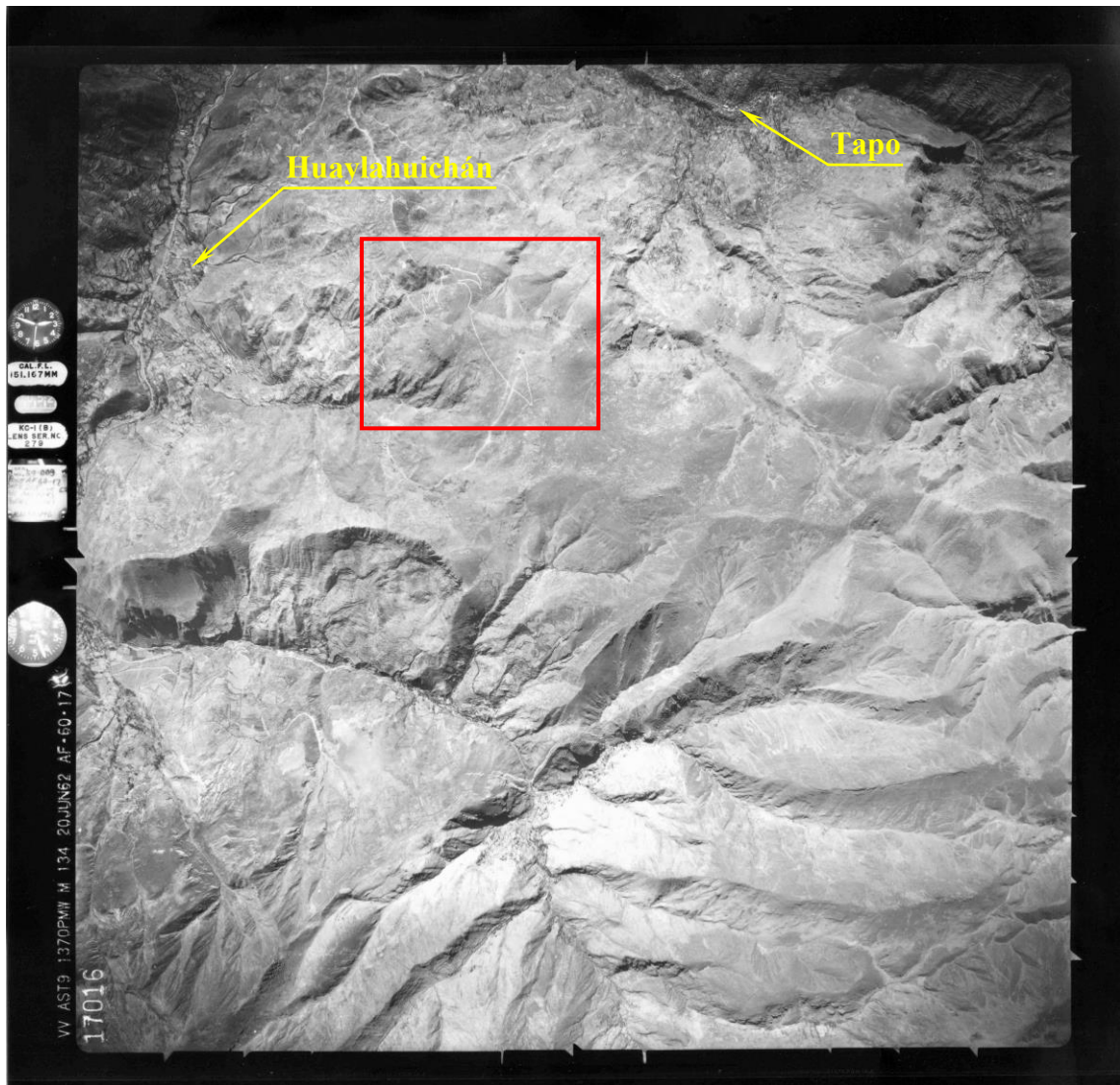


**Foto 9.-** Sobre los 4000 m.s.n.m., el relieve topográfico se torna suave, con pequeñas elevaciones, posiblemente como resultado de la última actividad glaciar (Sector Este del yacimiento).

En el área, las quebradas Felipito y Huaylahuichán, drenan agua durante todo el año, siendo tributarios de los ríos Tapo y Tarma respectivamente; estas aguas deben su origen a la presencia de escasos puquiales, siendo aprovechadas en las partes bajas, principalmente con fines agrícolas.

El clima de la zona, es típico de la región Puna; mostrándose lluvioso entre los meses de Diciembre a Marzo, y seco; aunque con escasas precipitaciones, entre los meses de Abril a Noviembre.





**Foto 10.-** Fotografía aérea donde se resalta la ubicación de la zona de trabajo, apreciándose claramente la suavidad del relieve de las partes altas cortadas por quebradas angostas, lugar donde se emplazan los centros poblados de Huaylahuichán y Tapo (Foto 17016. IGN, junio 1962).

## 2.3 Estratigrafía

### 2.3.1 Pre-Cámbrico

Formado por los macizos de Chupán-Huasahuasi y de Maraynioc-Mayrazo, son diferenciados por *Mégard* (1973) y actualmente se les conoce como Grupo Huácar (*Mégard et al.*, 1996), constituidos por esquistos micáceos, cloríticos y filitas, alternándose con lechos cuarzosos o cuarzo-feldespáticos y otros lechos mucho más delgados con sericitas, cloritas y ocasionalmente algo de biotitas; además como minerales accesorios leucóxeno, epidota y minerales opacos (Fotos 11 y 12). Estas rocas muestran fuerte deformación penetrativa, siendo producto de diferentes eventos; generando incluso interferencia de plegamientos a diferentes escalas (Plano 2.2). Es presumible que el protolito haya sido de naturaleza volcanoclástica (*Castroviejo*, 2006).

No hay una datación directa de esta unidad; pero comparándola con las granulitas de Puente Durán, ubicadas en la carretera de Chinchao a Tingo María (consideradas las rocas más intensamente metamorfizadas de la Cordillera Oriental), las cuales fueron datadas por el método U/Pb sobre cristales de zircón, dando como resultado edades aparentes de 610 a 630 millones de años (*Dalmayrac et al.*, 1977 en *Grandin et al.*, 1977 y *Dalmayrac et al.*, 1988); además en el Sur del Perú, donde el zócalo metamórfico Pre-Devoniano ha sido datado en 660 millones de años por *Stewart et al.*, (1974), y también con el Norte de Argentina, donde areniscas atribuidas al Cámbrico y cubiertas por el Tremadociano fosilífero (Ordoviciano Inferior), suprayacen discordantemente a esquistos verdes (*Turner*, 1970), ha permitido atribuir al Grupo Huácar, dentro del período Pre-Cámbrico.

Las rocas del Grupo Huácar afloran al Norte y al Nor-Este del área de estudio, en los alrededores del poblado de Huaylahuichán.



**Foto 11.-** Vista de afloramiento del Macizo Pre-Cámbrico, compuesto por esquistos sericíticos y cloríticos. (Ruta al pueblo de Tapo).



**Foto 12.-** Muestra de esquisto cloritoso, donde se aprecia claramente su esquistosidad y además un lente de cloritas. (Entrada al pueblo de Huaylahuichán).

## **2.3.2 Paleozoico Superior**

### **Grupo Ambo**

La serie del Grupo Ambo, se encuentra sobreyaciendo en discordancia angular sobre el Pre-Cámbrico, el cual hacia el lado occidental y sur, en contacto con la peridotita, se inicia con un conglomerado de grano medio a grueso, que contiene clastos de rocas metamórficas, cuarzo filoniano, cuarcitas y menos frecuentemente rocas intrusivas, la secuencia continúa con areniscas algo feldespáticas e intercalaciones de limolitas (Plano 2.2). Son depósitos molásicos, mayormente continentales y rítmicos (*Newell et al., 1953*), casi sin deformación penetrativa (por lo menos en el área estudiada), presentan colores que varían entre gris y pardo oscuro; y grosores variables que van de los decímetros a varios metros (Fotos 13 y 14).

En el contacto oriental y nor-oriental, el Grupo Ambo se presenta como volcánicos esencialmente de naturaleza tobácea, compuesta mayormente de horizontes dacíticos caolinizados (Foto 15), igualmente éstos se encuentran suprayaciendo a los esquistos precámbricos.

La serie del Grupo Ambo, ha sido datada como Missisipiano (Carbonífero Inferior), debido esencialmente a la presencia de fósiles de plantas como *Rhacopteris*, *Lepidodendron*, etc.

### **Grupo Tarma**

Igualmente, *Newell et al., (1953)*, reconoce al Grupo Tarma sobreyaciendo concordantemente al Grupo Ambo; aunque en algunos casos, puede encontrarse descansando con discordancia angular encima del Paleozoico Inferior a Medio o del Pre-Cámbrico (Plano 2.2). Su litología está constituida principalmente de calizas y areniscas silicificadas, concordantes con las dacitas del tope del Grupo Ambo, areniscas a veces conglomerádicas; a continuación lechos centimétricos de lutitas y areniscas cuarcíticas de grano fino, al tope de las cuales se observan a veces estructuras tipo “mud-cracks”; para finalizar con lutitas oscuras mostrando abundante

contenido de fósiles de braquiópodos y algunos restos de plantas. Esta secuencia aflora principalmente en el lado occidental del área (Foto 16).

La presencia de fósiles, especialmente de braquiópodos y fusulinas, asignan al Grupo Tarma como del Pensylvaniano Medio a Superior (Carbonífero Superior). Cabe destacar el hallazgo hecho por el Ing. Jorge Paredes A., de un resto fósil, con las características de un molde externo, correspondiendo a un gasterópodo aún no identificado (Foto 17).

## **Grupo Mitu**

La secuencia detrítica del Grupo Mitu, cubre con discordancia angular a rocas del Grupo Huácar y al Grupo Tarma; casi siempre infrayace discordante a las calizas de la Formación Chambará (Foto 18), pertenecientes al Grupo Pucará (*Mégard et al.*, 1996). Se encuentra representada por secuencias inicialmente detríticas que *Mc Laughlin* (1924) considera como molasas continentales y que en algunos lugares subyacen a secuencias volcánicas, ambos de colores rojizos a liliáceos.

El área presenta afloramientos, esencialmente de una secuencia terrígena gruesa constituida mayormente de conglomerados, cuyos cantos muestran poco desgaste, frecuentes pátinas herrumbrosas y facetas producto de la erosión eólica; además areniscas conglomerádicas (Foto 19), areniscas arcósicas, los cuales predominan mayormente sobre las limolitas y lutitas. Esta unidad aflora más al Sur-Oeste del área y al Este del poblado de Collpa. Al pie del camino al poblado de Palca, se tiene la presencia de material andesítico de color verdoso y algo de tobas dacíticas (?), presumiblemente, como parte del vulcanismo del Grupo Mitu (Plano 2.2).

Basados en su posición estratigráfica y en algunas dataciones radiométricas hechas en los volcánicos y plutones, es que se asigna al Grupo Mitu una edad Permiano Superior a Triásico Inferior (*Palacios et al.*, 1995).



**Foto 13.-** Conglomerado proveniente del Grupo Ambo, formado por clastos subredondeados de cuarzo lechoso a blancuecino, cuarcitas y esquistos.



**Foto 14.-** Corte del conglomerado, mostrando con mayor detalle sus componentes líticos, cementados por cuarzo ferruginoso.



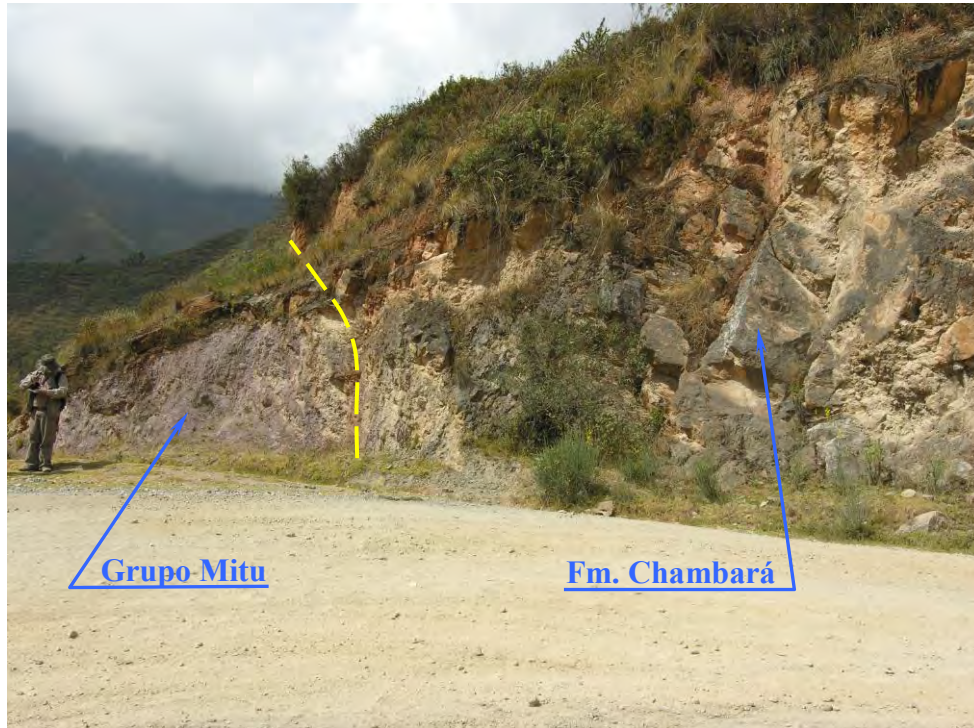
**Foto 15.-** Toba dacítica caolinizada y pigmentada por limonitas, mostrando parte de sus componentes líticos (Grupo Ambo).



**Foto 16.-** Lutita de color pardo ligeramente verdoso, del Grupo Tarma. Presenta recubrimientos y finísimas impregnaciones de limonitas.



**Foto 17.-** Molde externo de un gasterópodo en arenisca (Gpo. Tarma) con alto contenido de arcillas y micas (Gentileza del Ing. J. Paredes A.).



**Foto 18.-** Afloramiento de conglomerados molásicos del Grupo Mitu, en contacto con calizas de la Fm. Chambará, base del Grupo Pucará (Ruta a Tapo).



**Foto 19.-** Fragmento de conglomerado del Grupo Mitu. Se puede apreciar claramente sus clastos heterométricos en su típica matriz rojiza.



### **2.3.3 Mesozoico Inferior**

#### **Grupo Pucará (Formación Chambará)**

El Grupo Pucará fue definido por *Mc Laughlin* (1924) y *Jenks* (1951), siendo formalmente subdividido por *Mégard* (1968) en las formaciones Chambará, Aramachay y Condorsinga.

La Formación Chambará es la única unidad del Grupo Pucará presente en la zona, sobreyaciendo en discordancia erosional y a veces en débil discordancia angular encima del Grupo Mitu. Esta unidad se encuentra constituida por bancos de calizas gris oscuras, intercaladas con calizas dolomíticas y dolomías de potencias que varían en dimensiones decimétricas a métricas, separados por lechos centimétricos calcáreo-arcillosos. Esta secuencia aflora en los alrededores del pueblo de Collpa; así como también al Sur y al Este de la localidad de Tapo (Plano 2.2). En los alrededores del pueblo de Tapo, se han observado ciertos afloramientos de brechas constituidas por clastos subangulosos a subredondeados, mostrando dimensiones milimétricas a centimétricas de caliza gris oscura, cementadas por calcita recristalizada (Fotos 20 y 21), posiblemente como parte de alguna falla local.

Debido a la presencia de fósiles guía como *Entomonotis Ochótica* (bivalvos) y *Spondylospira* (Braquiópodos), es que se asigna a la Formación Chambará una edad correspondiente al Triásico Superior (Noriano-Retiano).



**Foto 20.-** Brecha de fragmentos heterométricos, subangulosos a subredondeados de calizas gris oscura cementada por calcita cristalizada (Ruta a Tapo).



**Foto 21.-** La brecha presenta un cemento calcáreo con numerosas oquedades, los cuales están rellenos con cristales escaloédricos de calcita (Geodas).

## 2.3.4 Cenozoico

### Cuaternario

Constituido esencialmente por bofedales, ubicados en las partes altas de las quebradas Felipito y Huaylahuichán. Muestran una suave pendiente a lo largo de las quebradas y una orientación preferencial de Sur a Norte, extendiéndose en el mayor de los casos por 1,5 km. Dichas quebradas poseen agua todo el año, siendo los principales tributarios de los ríos Tapo y Tarma. El lugar de los bofedales, presenta bastante cobertura vegetal, constituida principalmente de ichu (Foto 22), el cual sirve como forraje para los escasos animales del lugar; además es usado como refugio para pequeñas aves, formando un delicado ecosistema (Foto 23).

Estas quebradas se encuentran constituidas por material limoso y clástico, mostrando poco espesor, siendo el producto, posiblemente de una mezcla de material coluvial y morrénico, proveniente de las laderas de quebrada.



**Foto 22.-** Bofedal en la quebrada Felipito (Vista al Nor-Oeste).



**Foto 23.-** El bofedral forma un delicado ecosistema, brindando refugio y alimentación a la fauna del lugar.

## 2.4 Tectónica

*Dalmayrac et al.*, (1988) reconocen una tectónica polifásica a nivel regional para el Pre-Cámbrico, determinando hasta cuatro fases de plegamiento, denominadas del siguiente modo:

**Fase I**, siendo la más antigua, no ha sido posible diferenciarla en el campo, solo mediante estudios microscópicos, han podido ser observados porfidoblastos de plagioclasas y cuarzos, mostrando una morfología fusiforme alargada, contorneados por granos de cuarzo y/o minerales micáceos contemporáneos con la foliación. Se estima que esta primera fase es contemporánea de un primer evento de metamorfismo.

**Fase II**, es la fase más conspicua, manifestándose con la presencia de microplegues isoclinales con dimensiones decimétricos a métricos, mostrando planos axiales horizontales y cuyos ejes presentan una dirección aproximada Este-Oeste. Dicho microplegamiento esta asociado a una esquistosidad de flujo subhorizontal de dirección N 70° E y N 60° W. Esta segunda fase, al parecer es la mayor de todas, debida que ha obliterado todas las estructuras correspondientes a la primera fase.

**Fase III**, se manifiesta como un replegamiento de la esquistosidad de la Fase II. Origina pliegues decimétricos a métricos, en diferentes posiciones, asociados a una esquistosidad de plano axial hasta una esquistosidad de fractura (“strain slip”). Los

micropliegues presentan una dirección de sus ejes Norte-Sur, siendo la esquistosidad ligeramente inclinada al Este o al Oeste incluso a subhorizontal.

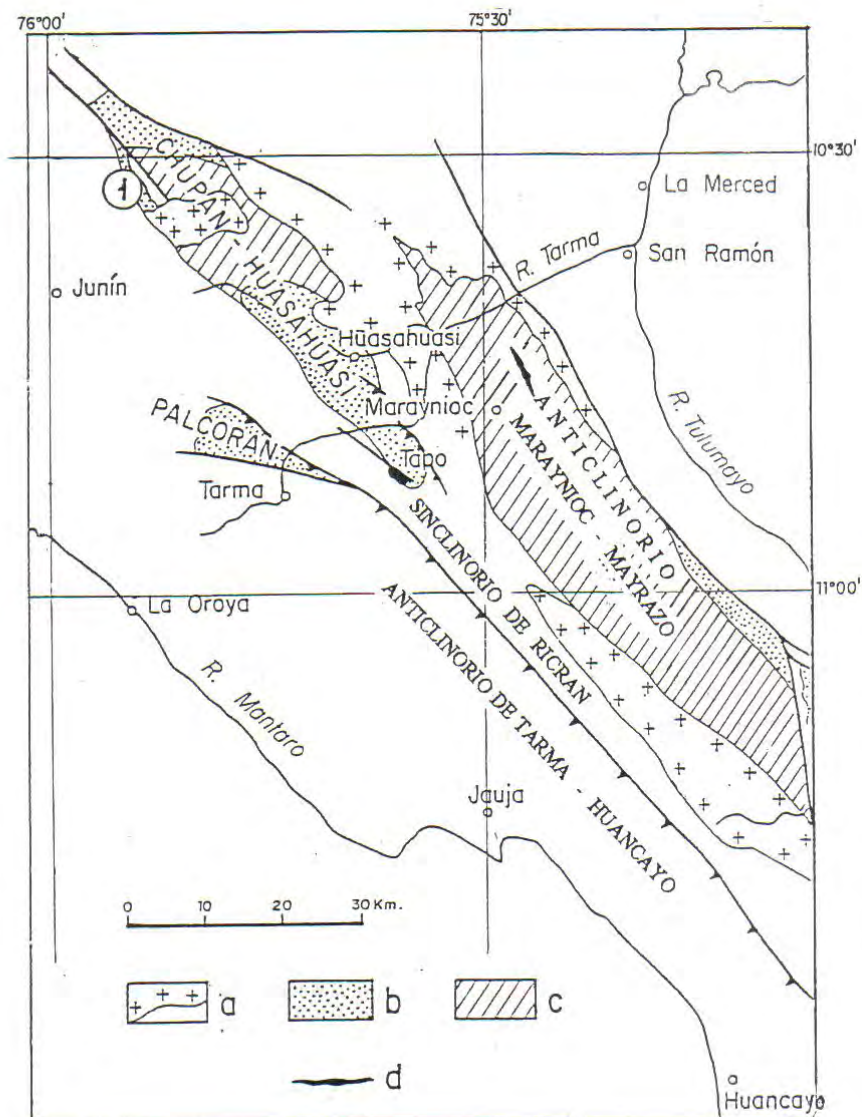
**Fase IV**, caracterizada por la presencia de pliegues en chevrón de amplitud variable generalmente abiertos, simétricos y de planos axiales subverticales. Se pueden observar dos direcciones preferenciales una Norte-Sur y la otra Este-Oeste.

En la figura 2.1, se ha destacado la disposición de los afloramientos tanto Precambrianos como de las rocas ultrabásicas en el cuadrángulo de Tarma y alrededores.

Posteriormente a las fases Precámbricas y ya en el Paleozoico Superior, se produjo lo que conocemos como “**Tectónica Hercínica**”. Ésta tectónica se manifiesta en tres etapas de deformación, marcadas siempre por una discordancia.

**Fase Eohercínica**, según *Mégard et al.*, (1971) y reproducido en *Mégard* (1979), sucedió entre el Devoniano Medio y el Mississipiano Inferior, manifestándose como un plegamiento en dos etapas, cuyas estructuras principales tienen una dirección Noroeste-Sureste a WNW-ESE y por una tectónica de ruptura tardía. A ésta última se encuentra asociado un magmatismo granítico, que es seguido por un plutonismo intermedio a ácido que se extiende en el Mississipiano.

La fase eohercínica, formó pues una verdadera cadena de montañas, que aparentemente se construyó encima de un sustrato siálico, ya que hasta ahora no se ha comprobado la presencia de ninguna sutura ofiolítica en la cadena. Bajo la discordancia eohercínica se observa a la serie metamórfica del Grupo Huácar, afectada por pliegues menores con buzamiento axial variable, acompañados por esquistosidad y a veces por un metamorfismo débil. En la parte superior de la discordancia, se tienen los depósitos clásticos del grupo Ambo del Mississipiano (Carbonífero Inferior).



**Figura 2.1.-** Macizos precambrianos y afloramientos de rocas ultrabásicas, en el extremo Sur-Este del macizo de Chupán-Huasahuasi. a) Granitoides hercínicos y andinos. b) Facies epizonales del Pre-Cámbrico. c) Facies mesozonales y catazonales del Pre-Cámbrico. d) Rocas ultrabásicas del Pre-Cámbrico. (Tomado de *Mégard et al.*, 1996).

**Fase Tardihercínica**, *Newell et al.*, (1953), establece la importancia del fenómeno como el cambio radical de naturaleza estratigráfica, pues es reconocido el paso de sedimentos marinos del Pensylvaniano Medio a Superior (Grupo Tarma) a sedimentos continentales del Permiano Superior (Grupo Mitu). La discordancia mostrada es de tipo angular, aunque de muy bajo grado entre las molasas del Grupo Mitu y los sedimentos del Grupo Tarma. Regionalmente, también es posible observar en algunos sectores, al Grupo Mitu suprayaciendo a los sedimentos clásticos del Grupo Ambo, con una fuerte discordancia proveniente de la fase eohercínica. Finalmente *Dalmayrac et al.*, (1988) asumen que la fase tardihercínica tuvo lugar durante el Permiano Medio.

Posteriormente a la fase tardihercínica, se ha reconocido una discordancia angular entre las molasas continentales del Grupo Mitu (Permiano Superior al Triásico Inferior) y la secuencia carbonatada de la Formación Chambará (Triásico Superior). Algunos investigadores coinciden en denominarla, como **Fase Finihercínica**; aunque al parecer es solo una reactivación de la fase tardihercínica, con fallamientos en bloques, asociados a una tectónica distensiva, formando estructuras como fosas y pilares tectónicos, a lo largo de un fallamiento longitudinal con rumbo NNW-SSE. Estos bloques también han sido cortados por un fallamiento transversal NEE-SWW de origen profundo (*Palacios et al.*, 1995). *Dalmayrac et al.*, (1988), asignan una edad para esta deformación desde el Permiano Superior al Triásico Inferior.

Según *Mégard et al.*, (1996), no habría detectado manifestaciones de una **Fase Peruana** (como parte de la **Tectónica Andina**) en la zona de estudio, aunque presume que ésta pueda mostrarse a manera de plegamientos, que afectarían a las series carboníferas y pérmicas, las cuales encajonan a ciertos emplazamientos de cuerpos intrusivos cuarzomonzónicos relacionados a la fase tardihercínica; dichos afloramientos se encuentran ubicados cerca de la localidad de Satipo. Observaciones de campo efectuadas recientemente en la zona de trabajo, por *Castroviejo y Feliciano* (2006), puede confirmar la idea de *Mégard* sobre la influencia de la tectónica andina en el área de Tapo.

### 3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO

#### 3.1 Estratigrafía

En la zona de estudio aflora un cuerpo de peridotita totalmente serpentizado, con dimensiones de 1,5 km x 4,0 km de superficie; el cual posee una forma lenticular elongada, mostrando una tendencia direccional NW-SE. En la actualidad, aún se desconoce el origen de su emplazamiento, por lo que diferentes investigadores han propuesto teorías, tales como:

- El emplazamiento de diques o sills interestratificados o de pequeños lacolitos, a partir de una inyección de magma ultrabásico profundo (*Grandin et al.*, 1977).
- La de un emplazamiento a manera de un diapiro, aprovechando zonas de debilitamiento, producto del fallamiento regional en rocas del Paleozoico Superior (*Mégard*, 1979).
- Debido a la presencia de una deformación interna dúctil, lo cual señala una historia tectónica pre-andina, relacionada con un ámbito profundo, mantélico. En el campo se ha observado, que los contactos con el Ambo, son principalmente tectónicos, apareciendo plegados por la deformación andina (*Castroviejo*, 2006).

Las dos primeras consideran al cuerpo de peridotitas de naturaleza autóctona y la tercera, como eminentemente alóctona.

Este cuerpo de peridotita serpentizada o mejor llamada serpentinita (debido a su composición mineralógica), muestra variaciones en su composición, las cuales se reflejan en cambios de coloración y textura, de acuerdo al comportamiento frente a los esfuerzos tectónicos predominantes.

Las ultramafitas se encuentran en contacto tectónico (contactos por falla, probables cabalgamientos); tanto por el Norte y Nor-Este, con volcánicos dacíticos caolinizados y silicificados; como por el Oeste y el Sur, con conglomerados, constituidos por clastos de cuarzo lechoso, cuarcitas, rocas metamórficas y menos frecuentemente rocas intrusivas y areniscas, todas estas unidades pertenecientes al Grupo Ambo; producto del cual, es posible observar en la zona de contacto, un claro proceso de milonitización y su posterior formación a una cataclastita (Foto 18). Cabe



resaltar, que no se ha podido observar relación alguna entre las ultramafitas y las formaciones Precámbricas del sustrato.

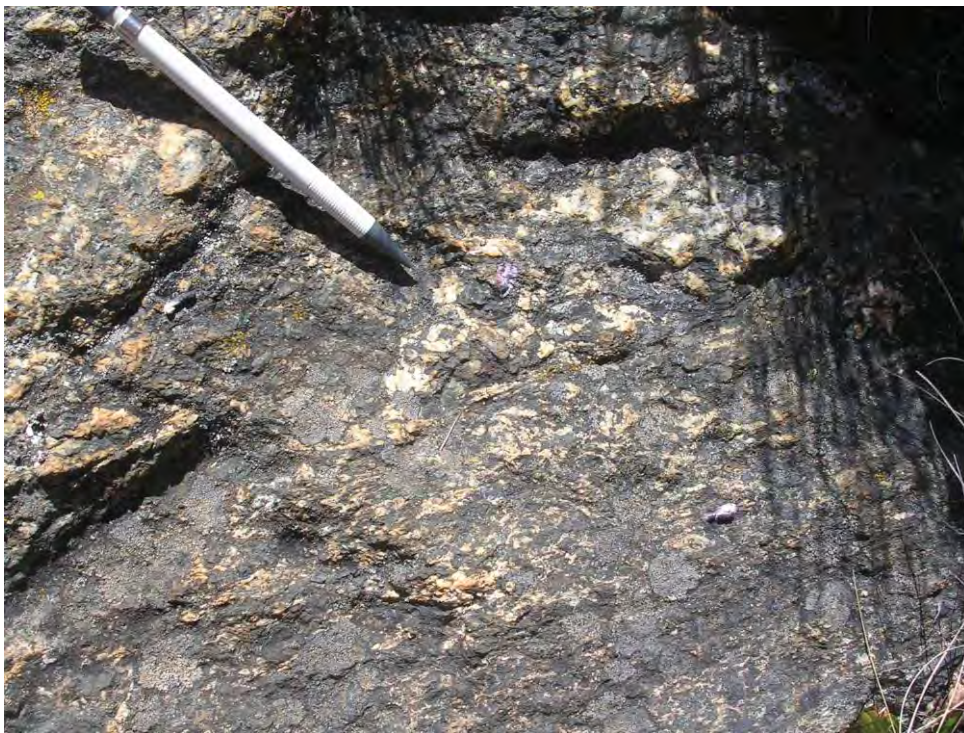


**Foto 18.-** Contacto tectónico entre las ultramafitas y los volcánicos tobáceos del Grupo Ambo (Vista tomada en el camino a San Felipe).

Estudios recientes sobre geocronología efectuados en el Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (Brasil) por *Tassinari* (2011) con algunas muestras apropiadas de roca, consigue asignar a las ultramafitas de Tapo una edad aproximada de 720 millones de años (Pre-Cámbrico), mediante el método Sm-Nd, sugiriendo que tanto los gabros presentes en el área como las cromitas fueron contemporáneos y proceden de una misma fuente mantélica. Del mismo modo establece mediante determinaciones radiométricas por el método K-Ar, que el complejo ultramáfico de Tapo, fue afectado por un episodio metamórfico, hace 450 millones de años (Ordovícico Superior), que alcanzó la facie de anfíbolita, enfriándose por debajo de los 500°C.

Dentro de estas rocas ultramáficas alteradas a serpentinitas, se pueden observar afloramientos de cuerpos de gabros, que en algunos sectores del yacimiento, especialmente en el sector occidental, aparecen mostrando su característica textura

cristalina de grano grueso; sin embargo y conjuntamente con las ultramafitas, fueron afectadas por los procesos de metamorfismo, llegando a convertirse en anfibolitas, mostrándose con una textura foliada. En el campo, ha sido posible observar una secuencia aparentemente gradacional, respecto a la transformación textural y mineralógica, desde los gabros propiamente dichos (Foto 19), pasando a metagabros (Castroviejo, 2006), donde es posible apreciar un cierto bandeamiento de la textura original de la roca ígnea (Foto 20), para finalmente convertirse en una anfibolita con su característica textura nematoblástica foliada (Foto 21).



**Foto 19.-** Afloramiento de gabro, mostrando de manera clara, una débil deformación de sus componentes primarios.



**Foto 20.-** Metagabro (*Castroviejo, 2006*), donde se puede apreciar una cierta foliación y la disposición de los cristales de plagioclasas y los ferromagnesianos.



**Foto 21.-** Anfibolita de aspecto foliado, donde es posible observar la notable esquistosidad de la roca.

Estos cuerpos de gabros y/o anfibolitas, se muestran a manera de intrusiones (diques), cortando al yacimiento en diferentes sectores; principalmente en el sector Sur-Oeste del yacimiento, mostrando una orientación Noroeste-Sureste, concordante con la dirección de la esquistosidad.

Finalmente, se tiene la presencia de diques de composición dacítica, mostrándose en afloramientos de formas tabulares y cortando a toda la secuencia de ultramafitas (Foto 22). Los diques se emplazan con una potencia aproximada de 9 m, presenta una orientación N 60° E, e inclinación casi subvertical (80° NW). En una muestra de mano se ha podido apreciar una textura porfírica de matriz felsosídica, englobando fenocristales de plagioclasas de formas tabulares, cristales anhedrales de cuarzo y escasa presencia de minerales máficos (menor al 2 %). Aparentemente presenta una débil silicificación.



**Foto 22.-** Dique de naturaleza dacítica, cortando a la secuencia de ultramafitas serpentinizadas (Vista tomada al Este del yacimiento).

En el campo se ha podido reconocer la presencia del dique, específicamente en dos sectores; tanto en la parte baja del área del antiguo campamento, aflorando entre los bofedales, como en parte de las elevaciones situadas al Este del yacimiento. No se ha

podido establecer el tipo de contacto entre el dique y las ultramafitas por encontrarse con cobertura; además tampoco existen datos sobre su edad, aunque puede ser muy aventurado afirmar que formen parte del vulcanismo del Grupo Ambo, esto debido principalmente a sus relaciones estructurales.

### **3.1.1 Ubicación de los Cuerpos Minerales**

La importancia de la zona, radica en la presencia de la mineralización de cromo, siendo su manifestación, en la especie mineral denominada cromita, cuya fórmula empírica está dada por  $\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$  (Fleischer, 1980). Se muestra principalmente como un mineral de color negro a negro parduzco, de aspecto predominantemente masivo y en ocasiones mostrando hábito granular; como característica principal, la raya de color pardo y una dureza de 5,5 según la escala relativa de Mohs.

Se considera que el origen de este yacimiento, se ha debido al producto de la cristalización y solidificación directa del magma ultrabásico a grandes profundidades, donde predominan presiones y temperaturas extremadamente altas (superior a los 1200°C). Al disminuir estas condiciones de presión y temperatura, se origina el proceso denominado “Segregación Magmática”, donde cristalizan los minerales que posteriormente darán origen a las rocas ígneas ultramáficas. Es en este proceso que se inicia la formación de minerales de cromo, platino, cobre, titanio y hierro, tanto como sulfuros y óxidos, al mismo tiempo que los silicatos de hierro y magnesio (olivino). Vázquez (1996), sostiene que las concentraciones de estos minerales debido a la diferenciación por cristalización gravimétrica, da origen a su posterior precipitación por gravedad, formando inicialmente cuerpos tabulares los cuales, posteriormente son rotos por movimientos tectónicos, para finalmente acumularse en cuerpos de aspecto nodular a lenticular elongado (boudins).

La cromita proveniente de Tapo, se encuentra asociada a las serpentinitas (peridotitas serpentinizadas), principalmente a las denominadas “serpentina verde amarillenta” y “serpentina verde botella”, mostrándose como nódulos mayormente elongados y deformados de dimensiones centimétricas a métricas (Fotos 23 y 24). Existen reportes antiguos, en los que se mencionan que en el sector de San Felipe, se encontraron bloques de cromita mayores a los 10 metros de diámetro (Zeller, 1966)

expuestos en la superficie (Fotos 1 y 2), producto de la erosión temprana de la roca encajonante.

Los cuerpos de cromita hallados, presentan por lo general una distribución bastante errática a excepción de dos áreas bien marcadas, San Felipe y la Franja Felipito o también llamada Franja Rumicruz – Tomasa – Felipito (Plano 3.1). Es en estas zonas donde predominan las serpentinas tanto verde amarillenta como verde botella, y en la cual, usualmente se encuentran los nódulos de cromita, alineados concordantemente con la orientación de la esquistosidad predominantemente Nor-Oeste. Se debe tener en cuenta que la llamada Franja Rumicruz – Tomasa – Felipito, también presenta dicha orientación.

Los cuerpos mineralizados observados, si bien presentan una alineación acorde a la dirección de la esquistosidad; no presentan una continuidad entre los cuerpos; sino más bien muestran una distancia que varía entre 8 y 15 metros entre cuerpo y cuerpo (Plano 3.2).



**Foto 23.-** Cuerpos de cromita con disposición lenticular elongada en serpentina tipo verde amarillenta (Zona Rumicruz)



**Foto 24.-** Nódulo de cromita, mostrando su aspecto lenticular en serpentina tipo verde amarillenta (Zona San Felipe).

### 3.2 Estructural

Atendiendo a las diferentes fases de deformación que presenta el área de estudio es necesario realizar un trabajo de evaluación tectónica y microtectónica con bastante detalle; objetivo que escapa a los alcances del presente trabajo. Sin embargo se ha podido apreciar que los rasgos estructurales están marcados por la esquistosidad penetrativa y cizallamiento de las serpentinitas, las cuales presentan una dirección predominantemente Nor-Oeste, siendo concordante con la alineación de los ejes del plegamiento regional y de los cuerpos subordinados de anfibolitas lo que sugiere una historia tectónica común y diferenciada a la roca encajonante.

Dependiendo de su competencia, es posible observar que las serpentinitas, presentan un comportamiento diferente a las fuerzas tectónicas. De tal modo, se advierte que pueden presentar fracturas (deformación frágil), otras presentan plegamientos (deformación dúctil) y que incluso las más plásticas se pliegan y laminan hasta alcanzar el grado de la esquistosidad. Las fracturas tienen dirección transversal a la lineación (Hernández, 2005).

*Paredes et al.*, (2006), realizan un levantamiento estructural generalizado de la zona de estudio, donde no diferencian al ciclo Pre-Cámbrico del Hercínico, mostrando un primer episodio de deformación “n” con una foliación de penetración asociado a una blastesis de mineral, el cual es afectado por un segundo episodio de deformación

originando una crenulación y plegamiento a la foliación anterior; producto probablemente de una compresión en dirección promedio NE-SW.

De igual modo, se tienen dos episodios de deformación para el ciclo Andino, los cuales corresponden a pliegues y fallas. El primer episodio de deformación corresponde a una compresión de dirección NW-SE que habría generado un plegamiento NE-SW y fallas con vergencia hacia el Sur-Este (Falla Tapo). El segundo episodio corresponde a un plegamiento y fallamiento con vergencia hacia el Nor-Este, producto de una compresión NE-SW.

El primer episodio corresponde a un plegamiento de dirección NE-SW, probablemente este mismo episodio haya originado también el sobreescurreamiento de Tapo con vergencia hacia el Sur-Este.



## **4. CARACTERÍSTICAS DE LA MINERALIZACIÓN**

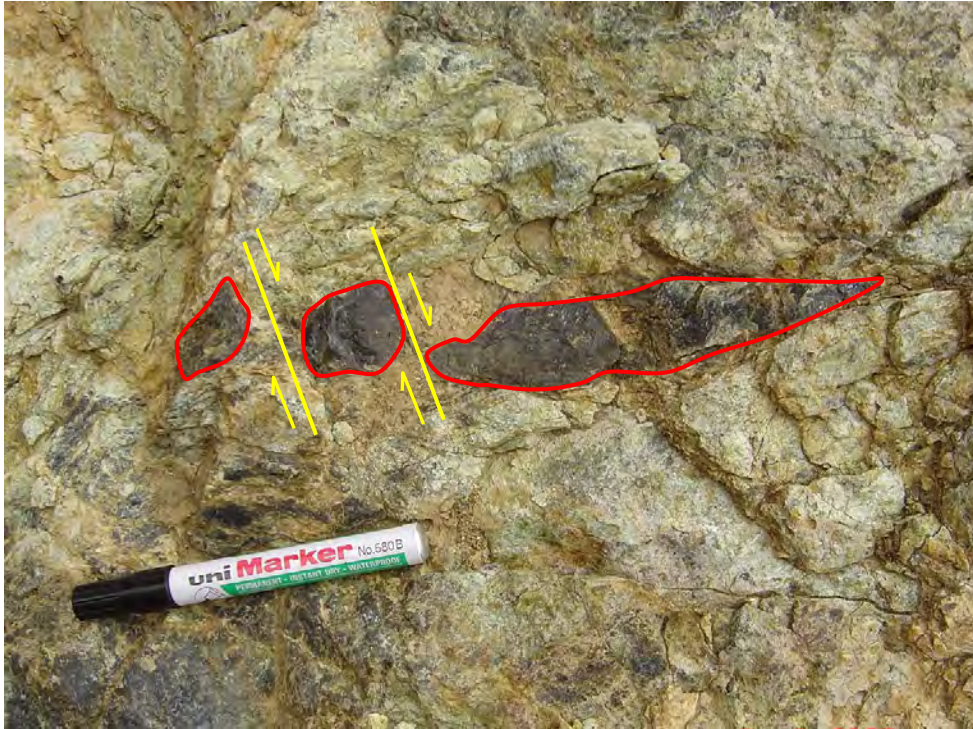
### **4.1 Geometría de los Cuerpos**

Debido a la complejidad estructural de la zona de estudio; se ha visto la necesidad de establecer y solo para este trabajo, tres formas geométricas principales para la ocurrencia de cromita. Tomándose como referencia los informes internos de REPSA (*Hernández, 1991*), además de las observaciones y estudios efectuados por el presente autor, dichas formas responden principalmente tanto a la morfología expuesta en superficie como también a su importancia económica.

#### **Podiformes (Nódulos elongados)**

Siendo la forma más frecuente en gran parte del terreno, consisten en cuerpos redondeados, subredondeados e incluso deformados con cierta elongación; se presentan en diversos tamaños, desde decimétricos a métricos. Estos nódulos o “boudins” están distribuidos aparentemente en forma errática, pero se encuentran en un horizonte litológico definido, principalmente dentro de las serpentinitas verde amarillentas (Foto 25). Inicialmente estos cuerpos son formados a partir de estructuras tabulares, siendo posteriormente fracturados y deformados por procesos tectónicos (*Vázquez, 1996*), los que le dan su forma final.

En este caso, el término “boudins”, lo hemos considerado como sinónimo de “nódulo elongado”, debido a que estas estructuras se originan por la extensión de capas o niveles competentes, separados parcial o totalmente en fragmentos. La palabra es de origen francés y significa “morcilla”, la cual describe muy bien las formas mostradas a menudo por estas estructuras. El proceso generador de boudins se denomina “boudinage” (*Martínez, 2002*).



**Foto 25.-** Nódulos (boudins) de cromita, formados a partir del fracturamiento y posterior desplazamiento corto de un cuerpo tabular (Zona Rumicruz).

### **Vetiformes**

Como su nombre lo indica, esta forma posee la apariencia de una veta con potencias que oscilan entre los 20 cm a 80 cm como máximo; aunque en realidad corresponde a una secuencia de nódulos continuos que alcanzan longitudes de hasta 20 m (Foto 26). Se encuentra relacionado mayormente a estructuras de falla, inclusive en ciertos tramos es posible identificar la caja piso con espejos de falla bastante estriados. Cabe destacar que si bien tienen la apariencia de una veta, el buzamiento mostrado puede llegar a ser muy variable, incluso también pueden hallarse algo plegados. Así se ha observado en las zonas de Tomasa, Rumicruz Este, Felipito y también muy ocasionalmente en el área denominada La Curva (*Hernández, 1991*).



**Foto 26.-** Estructura vetiforme formada por una serie de nódulos fragmentados de cromita. La estructura se encuentra deformada (Área La Curva).

### **Estratiformes**

Se han determinado cuerpos de cromita, que a manera de mantos, afloran en superficie (Foto 27), presentan potencias variables desde 10 cm a 20 cm, tendiendo a un rumbo Norte-Sur y con una inclinación que varía desde unos cuantos grados hasta la horizontal, desarrollándose de forma continua con dimensiones que pueden alcanzar los 70 m (Uribe, 1992). En un sector a 400m al Este del antiguo campamento, se encuentra el área Manto, debiendo su denominación a lo frecuente de encontrar este tipo de ocurrencia. La mineralización de cromita presente es de baja calidad, debido principalmente a la presencia de talco producto de la alteración de la serpentina, brindándole a la cromita un color gris blanquecino.



**Foto 27.-** Estructura mineralizada de cromita mostrando su aspecto estratiforme, en serpentinita verde amarillenta. Se encuentra afectada por una falla inversa de corto desplazamiento (Zona Manto).

## 4.2 Distribución de los Cuerpos

El yacimiento de cromita de San Felipe se encuentra emplazado en rocas totalmente serpentinizadas, producto de la fuerte alteración del material ultrabásico preexistente, las cuales; aún conservan algunas características de un protolito de tipo harzburgítico y en menor medida dunítico (*Fanlo et al., 2009*), penetrando a su vez en rocas Precambrianas del Grupo Huácar, consistente mayormente en esquistos y filitas.

Los cuerpos de cromita han sido hallados; con excepciones muy erráticas, en dos áreas bien marcadas, que *Hernández (1991)* denominó como: Franja Felipito y Franja San Felipe (Plano 3.2).

*La Franja Felipito*, se encuentra formada por tres zonas principales conocidas como Rumicruz, Tomasa y Felipito. Usualmente, se presenta litológicamente constituida por serpentinita verde amarillenta a serpentinita gris verdosa. Dicha área se extiende desde Rumicruz por el Nor-Oeste, pasando por el área Tomasa hasta llegar a Felipito

al Sur-Este; estimándose un ancho aproximado de 200 m y una longitud de 1500 m, donde se ubican las siguientes áreas mineralizadas:

## **Rumicruz**

Los cuerpos de cromita hallados, presentan formas de nódulos elongados, concordantes con la esquistosidad de las serpentinitas verde amarillentas y verde botella, controladas a su vez, por fallas de rumbo general Noroeste-Sureste, mostrando una inclinación promedio de 40° SW.

Labores antiguas de exploración realizadas en Rumicruz, han permitido descubrir zonas favorables tanto al Oeste como al Este del área.

En el lado Oeste se han encontrado dos estructuras paralelas conteniendo “boudins” lenticulares de cromita, con dimensiones de hasta 1,0 m de largo por 0,5 m de ancho, de rumbo N 60° W y buzamiento de 40° SW.

En el lado Este y a una distancia aproximada de 130 m del anterior, se tienen dos labores antiguas. En la primera de ellas, se han extraído tres cuerpos pequeños de cromita, quedando por extraer más nódulos en el frente; la estructura que contiene, posee una orientación N 40° W y una inclinación de 25° SW (Foto 28). En la segunda labor se extrajeron “boudins” de cromita, quedando aún restos emplazados en una estructura con rumbo N 55° W y buzamiento 15° SW.

Cabe remarcar, un fuerte incremento en el contenido de óxidos de hierro, en el lado Este; de tal manera que los cuerpos de cromita se presentan casi siempre recubiertos por una pátina de óxidos. También se observan sectores con cuerpos de esquistos cloritosos, con desarrollo de cristales euédricos de **magnetita**, de hábito octaédrico (Fotos 29 y 30).



**Foto 28.-** Crestones de serpentinita verde botella, con orientación N 40° W e inclinación subvertical. Obsérvese los planos de foliación (Sector Sur de Rumicruz).



**Foto 29.-** Muestra de esquistos cloriticos con diseminaciones de cristales de magnetita (Rumicruz).



**Foto 30.-** Afloramiento de serpentinitas tipo verde botella, donde es posible observar cristales de magnetita diseminada (SE del área de Rumicruz).

## **Tomasa**

En dirección Sur-Este y a una distancia aproximada de 450 m de Rumicruz, se ubica el depósito Tomasa, el cual fue hallado en los inicios de la década del 90. Actualmente, se encuentra explotado en su totalidad, habiéndose extraído los volúmenes más significativos de cromita. Los cuerpos más importantes mostraron desde formas circulares, variando a nódulos elongados, llegando a medir hasta 7,0 m de diámetro y alcanzando una profundidad visible mayor de 3,0 m. Dichos cuerpos se encontraron emplazados en una estructura; en serpentinitas verde amarillentas de aspecto esquistosa y talcosa, mostrando un rumbo preferencial N 40° W.

En la fotografía 31, se aprecia una vista panorámica de gran parte de las labores minadas, correspondientes al área Tomasa y en la foto 32 la serpentinita verde botella muy fracturada.

La cromita encontrada en esta zona, presenta un color pardo ligeramente claro, mostrando una superficie algo talcosa y en sectores exponiéndose un fracturamiento a lo largo de los planos de clivaje.



**Foto 31.-** Vista panorámica del área de Tomasa, apreciándose parte de las labores de minado superficial, además de las canchas de material estéril. (Vista tomada desde San Felipe con dirección Sur-Oeste).



**Foto 32.-** Antigua labor de exploración en la zona de Tomasa. La roca corresponde a serpentinita verde botella bastante fracturada.

## **Felipito**

Siguiendo la misma dirección Sur-Este y casi a 800 m de distancia de Tomasa, se encuentra localizado el cuerpo mineralizado de Felipito. En este depósito se llegaron a reconocer, numerosos nódulos de cromita de geometría podiforme, controlados por una falla de rumbo N 40° W y buzamiento 80° SW, encontrándose emplazados en serpentinita verde amarillenta, siendo además concordante con la esquistosidad. También ha sido posible observar a manera de inclusiones, nódulos de una serpentinita verde oscura principalmente en la caja techo. Por causa del fallamiento, dichos cuerpos nodulares han sufrido ligeros desplazamientos, tanto en la horizontal como en la vertical, mostrándose en forma escalonada. La mineralización de cromita extraída, presenta un color pardo negruzco con una superficie lustrosa.

Se debe resaltar la presencia de dos antiguas galerías de exploración, encontrándose en niveles diferentes pero comunicados por medio de una chimenea vertical. Las razones de las labores han sido buscar una relación entre la disposición de los nódulos mineralizados de cromita con la falla antes mencionada (Fotos 33 y 35).

Aledaña a esta zona, se encuentran los restos del campamento de trabajadores, el cual proveía de las necesidades básicas tanto de alimentación, así como de hospedaje para las personas que laboraban en el yacimiento (Foto 34).





**Foto 33.-** Vista lateral de las labores y bocamina de exploración en la zona de Felipito.



**Foto 34.-** Restos del campamento de REPSA, el cual funcionó en la década del 90 (Zona de Felipito).



**Foto 35.-** Panorámica de las labores de Felipito (Tomada desde el Este).

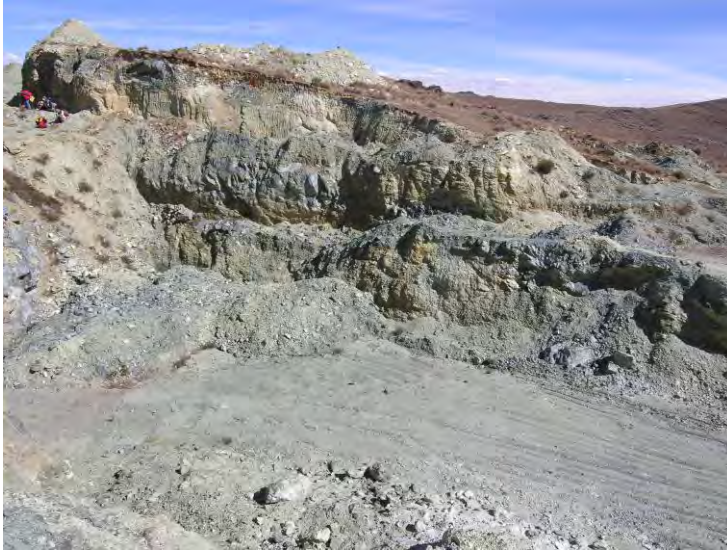
*La Franja San Felipe*, es la zona que presenta las labores de desarrollo más antiguas, siendo subdividida inicialmente en cuatro zonas denominadas: Pacchón, Curva, Campamento y Manto. Debido a la cercanía y similitud entre estas áreas, se ha creído por conveniente describirlo como una sola extensión.

San Felipe se encuentra ubicado aproximadamente a 1 km de distancia en dirección Nor-Este de Rumicruz, constituyendo el primer depósito de cromita encontrado, hallándose cubierto superficialmente por diferentes labores de exploración y desarrollo, realizadas en su mayoría entre 1960 y 1990 (Fotos 36 y 38); incluso se observan galerías de exploración de hasta 500 m, los cuales por desconocimiento inicial del depósito, fueron construidas prácticamente en material estéril.

En la zona se han encontrado numerosas estructuras de cromita principalmente en serpentinita verde amarillenta, las cuales presentan formas diversas; desde los frecuentes nódulos elongados (incluso, alcanzando a tener apariencias casi esféricas) hasta llegar a observarse cuerpos estratiformes no muy gruesos pero de extensiones métricas. Por lo general, los cuerpos de cromita presentan un control estructural relacionado a fallas, con direcciones variables entre N 15° W y N 55° W; incluso algunas estructuras presentan dirección Norte-Sur. Del mismo modo, las inclinaciones también oscilan entre 30° y 60° con dirección Oeste.

La cromita extraída presenta un color que varía de pardo grisáceo a pardo negruzco, mostrando en ocasiones un aspecto granular grueso, variando por lo general a masivo (Foto 37). Puede presentar un fracturamiento muy fino con relleno de crisotilo de aspecto fibroso o también mostrar contenido de talco de hábito pulverulento, cuya presencia tiende a bajar la calidad del mineral explotado.

Asimismo, fueron observados cuerpos nodulares incluidos en las serpentinitas, mayormente de dimensiones centimétricas a métricas de color liliáceo (antiguamente considerada como una variedad de serpentinita), producto de la alteración hidrotermal del protolito ultramáfico serpentinizado, pero con contenido de cromo. Las muestras fueron sometidas a los estudios mineralógicos respectivos en el laboratorio de mineralogía de la UNI (Lima - Perú) y posteriormente confirmados en la UPM (Madrid - España), logrando caracterizar a esta especie, como un carbonato hidratado de cromo y magnesio denominado **stichtita** ( $\text{Mg}_6\text{Cr}_2[(\text{OH})_{16}|\text{CO}_3].4\text{H}_2\text{O}$ ).



**Foto 36.-** Aspecto actual de la labor principal en el área San Felipe (Vista con dirección al Sur).



**Foto 37.-** Cuerpos de cromita en “boudins”, deformados y emplazados en serpentinita verde amarillenta (San Felipe).



**Foto 38.-** Vista parcial con dirección Norte, del área de San Felipe, mostrando las canchas donde se depositaba el material extraído, para su posterior selección (Pallaqueo).

### 4.3 Petrografía y Mineralogía

Las rocas que albergan la mineralización de cromo, corresponden esencialmente al tipo denominado como serpentinitas. Dichas serpentinitas, son el resultado de la alteración por hidratación de los minerales primarios que forman parte de una roca ultramáfica (rocas con contenido de minerales máficos mayor a 90%) y a su vez asociada a una escasa lixiviación de los componentes químicos originales (*Moody*, 1976). Estas rocas muestran variaciones en su composición, principalmente en el contenido de hierro, las cuales se reflejan en cambios de coloración, textura y comportamiento físico frente a los esfuerzos tectónicos. *Hernández* (1991), realizó una clasificación bastante generalizada, basándose en las características físicas (color) de las serpentinitas encontradas en el depósito, subdividiéndolas en:

- **Serpentinita Gris Verdosa**, constituye la variedad más abundante, se caracteriza por encontrarse prácticamente masiva, con frecuencia muestra una apariencia granular y brechosa (Foto 39), otras veces se encuentra esquistosa a lo largo de franjas; en este caso, siempre relacionados a las serpentinitas verde amarillentas. Por lo general, esta serpentinita muestra una fractura irregular y brillo opaco, siendo más resistentes a la meteorización debida principalmente a su dureza, presentando un menor grado de alteración, de tal modo que forman relieves ligeramente abruptos, como en las zonas Rumicruz y Felipito Alto. Cuando se presentan masivas son estériles; en cambio, en las zonas esquistosas contienen algunas estructuras mineralizadas con magnetita y sulfuros, siendo éstas concordantes a la esquistosidad. De la zona de Felipito Alto, se han podido obtener muestras de serpentinita gris verdosa con dichas características. Otra de las particularidades encontradas, es que asociadas a estas rocas se encuentran afloramientos a manera de sombreros de hierro, el cual *Iberico* (1958) mencionó en su informe; que ya en 1939, *Harrison* había realizado estudios petrográficos a muestras provenientes del lugar, indicando que corresponden a una serpentinita de enstatita (probablemente, proviene de una peridotita de piroxenos).



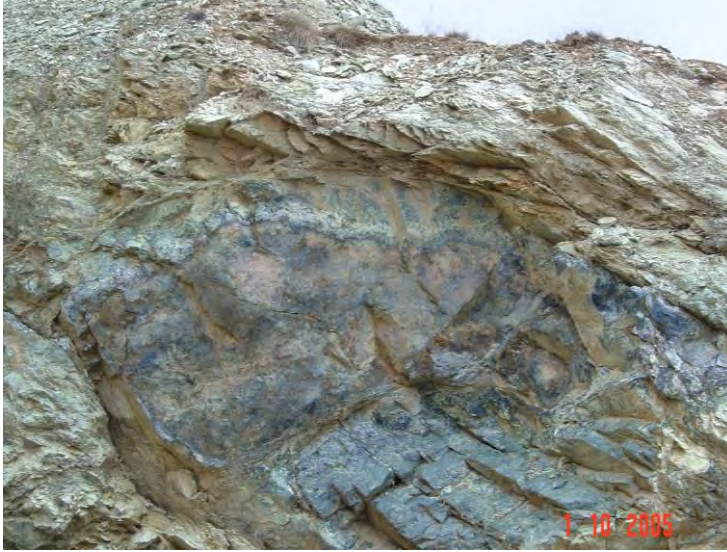
**Foto 39.-** Afloramiento de serpentinita gris verdosa (SE del área de Rumicruz).

- **Serpentinita Verde Amarillenta**, resulta ser la típica roca encajonante de las estructuras mineralizadas de cromita, mostrando como característica principal su fuerte esquistosidad. Debido a su baja dureza, llega a formar superficies suaves y onduladas, tal y como se observa en las áreas de Rumicruz, Tomasa y parte de Felipito así como en amplios sectores de San Felipe, específicamente en el sector Campamento (Foto 40). Ha sido posible determinar en el terreno, que este tipo de roca se encuentra a manera de dos franjas alargadas que van generalmente de Nor-Oeste a Sur-Este, abarcando anchos de hasta 200 m para la Franja Felipito y 400 m para la Franja San Felipe. Junto a la mineralización de cromo también se ha podido encontrar la ocurrencia de magnetita a manera de finas diseminaciones y en algunos casos como playas con dimensiones milimétricas; así mismo, también se han observado escasas diseminaciones de sulfuros como pirita muy fina entre otros. Ésta variedad de serpentinita puede presentar colores que varían desde el verde blanquizo a blanco amarillento, debido a la presencia de talco, dando a la roca un aspecto escamoso, producto de un mayor grado de alteración de la serpentinita.



**Foto 40.-** Afloramiento de serpentinita verde amarillenta, bastante esquistosa (San Felipe).

- **Serpentinita Verde Botella**, esta roca puede encontrarse emplazada tanto como cuerpos masivos y también a manera de lentes, los cuales se hallan casi siempre asociadas a la serpentinita verde amarillenta (Foto 41). Este tipo de serpentinita se caracteriza por ser de color verde oscuro casi negro, mostrándose bastante compacta, además de presentar un brillo graso, aunque muy lustroso en las superficies de fractura. Otra característica importante que identifica a este tipo de roca, es que al romperla, ésta se separa siguiendo planos ortogonales con bordes algo filosos, dando como resultados bloques seudocúbicos. Esporádicamente estas fracturas pueden presentar relleno de crisotilo de aspecto asbestiforme. Puede mostrar una ligera mineralización de magnetita muy fina; además, ocasionalmente se han observado algunas diseminaciones de sulfuros. Asociada a la serpentinita verde amarillenta, constituye ya sea la caja piso o caja techo de las estructuras mineralizadas, como puede observarse en la mayoría de las labores del área Campamento (San Felipe) así como también en las áreas Felipito y Felipito Alto (Felipito). En otras ocasiones se encuentra formando grandes cuerpos estériles masivos y fracturados; conclusión a la que se llega, debido a la observación del material acumulado en las canchas de desmonte, provenientes de los dos túneles de exploración desarrollados en la zona denominada Campamento (Franja San Felipe).



**Foto 41.-** Lente de serpentinita verde botella en serpentinita verde amarillenta. Nótese la característica de su fracturamiento (San Felipe).

En varios sectores del terreno, se ha podido observar que las serpentinitas antes descritas son cortadas por intrusiones a manera de diques de rocas básicas de composición gabroica. Dichos afloramientos predominan principalmente en el sector occidental, con una orientación Noroeste-Sureste, concordante con la dirección de la esquistosidad. Estas rocas muestran su característica textura cristalina de grano grueso; sin embargo y conjuntamente con las ultramafitas, fueron afectadas por el metamorfismo, llegando a convertirse en anfibolitas, mostrándose con una textura nematoblástica foliada (Foto 42). Estos cuerpos de gabros y/o anfibolitas, se muestran a manera de intrusiones (diques) de potencias variables, cortando al depósito en diferentes sectores; principalmente en el sector Sur-Oeste del yacimiento,



**Foto 42.-** Afloramiento de anfibolita, mostrando su típica textura foliada nematoblástica, cercana al contacto con las ultramafitas (Interior de labor Tomasa).

Finalmente y como se mencionó en párrafos anteriores los cuerpos de cromita constituyen la mena principal del yacimiento, mostrándose principalmente como nódulos elongados (boudins), además de pequeñas estructuras estratiformes y vetiformes. Estas estructuras de cromita puede llegar a tener dimensiones centimétricas a métricas. La mineralización de cromita puede presentarse tanto desde un hábito masivo a granular (Foto 43). También se han determinado ocurrencias de magnetita, desde finas diseminaciones en la serpentinita, incluso como playas milimétricas, así como la presencia esporádica de sulfuros diseminados muy finos.



**Foto 43.-** Mineralización de cromita de hábito granular, intercrecida con finos minerales de naturaleza serpentínica (Sector La Curva).

#### **4.4 Distribución de Cr-Ni**

De acuerdo a las referencias bibliográficas obtenidas, se ha reinterpretado la distribución del níquel a partir de un estudio geoquímico realizado en un área restringida de los afloramientos de rocas serpentinizadas de la zona de tapo.

La desaparecida “Cerro de Pasco Corporation” (*Iberico*, 1958), realizó una cuidadosa prospección geoquímica en el área de Tapo, específicamente en el área actualmente conocida como Rumicruz. Estableció una malla de muestreo de 50 m distribuidas en afloramientos de peridotita seleccionadas para tal fin. El área abarcó una línea Norte-Sur de unos 1100 m de extensión.



En total, fueron tomadas 468 muestras, de los cuales 387 corresponden a muestras de suelos y 81 a muestras de rocas. El background en las peridotitas serpentinizadas es de 500 ppm.

Los elementos níquel y cobalto fueron analizados por comparación de spot filtrados y el elemento cromo por comparación de soluciones por colorimetría.

### **Distribución del Cromo**

De todas las muestras tomadas, 21 muestras de roca y 6 muestras de suelos fueron analizados. Los valores en todos los casos muestran concentraciones altas, mayores a 5000 ppm de cromo.

Estos valores confirman la presencia de cuerpos y lentes masivos de cromita en todo el depósito de Rumicruz.

### **Distribución del Níquel**

Los resultados obtenidos para los valores de níquel, fueron clasificados de la siguiente manera:

- a. 0 a 500 ppm, no han sido considerados. Por lo general, debido a los suelos residuales y transportados a partir de rocas sedimentarias.
- b. 500 a 1000 ppm, estos son considerados como background. Bajos contenidos de un determinado horizonte de peridotita serpentinizada (serpentinitas).
- c. 1000 a 2000 ppm, son considerados como anómalos.
- d. Valores mayores a 2000 ppm, se consideran como altamente anómalos.

Se ha podido observar que dentro de la zona de serpentinitas, hay lugares con un rango de concentración de níquel que está entre 0 y 500 ppm, debido principalmente a la presencia de esquistos cloritosos y diques de anfíbolitas bandeadas.

Todas las demás muestras tomadas en la zona de las serpentinitas (rocas y suelos), dan valores mayores que 500 ppm de níquel; destacando que 192 muestras de suelos

dan valores mayores que 1000 ppm, de los cuales 61 muestras contienen más de 2000 ppm, y de estos 28 contienen de 3000 ppm a 4000 ppm de níquel.

Con respecto a las muestras de rocas, el 50 % presentan valores mayores a 2000 ppm y de estos muchos tienen de 3000 a 4000 ppm e incluso, algunos llegan a 5000 ppm de níquel. En el otro 50% de muestras de rocas, se han observado concentraciones entre 1000 y 2000 ppm, salvo la excepción de 8 muestras que contienen valores un poco menores a 1000 ppm de níquel.

Por lo tanto *Iberico* (1958) en su informe, admite la conclusión de que los elevados valores obtenidos, considerados como anómalos, no significa necesariamente la existencia de un depósito de níquel, sino que simplemente la ultramafita, contiene níquel en gran parte de su masa. Debemos recordar, que las anomalías coinciden con las muestras tomadas directamente de la roca.

En el plano 4.2 se ha graficado la distribución de los isovalores de níquel, mostrando a las concentraciones anómalas hacia la parte central, correspondientes al afloramiento de rocas ultrabásicas del área de Rumicruz; por lo tanto, el níquel estaría distribuido en forma diseminada en la masa de peridotita serpentizada.

### **Distribución del Cobalto**

En todos los casos, los análisis por cobalto dan valores considerablemente inferiores a las de níquel, siendo el valor máximo de 150 ppm. Al parecer se encuentra más uniformemente distribuido, talvez debido a su mayor solubilidad que permite la difusión a un sistema más uniforme.

## **5. ESTUDIOS PETROGRÁFICOS Y MINERAGRÁFICOS**

Para desarrollar las descripciones petrográficas y mineragráficas correspondientes, fueron recolectadas alrededor de cincuenta muestras diferentes, tanto de las labores mineralizadas más importantes, así como de los afloramientos más representativos del yacimiento. Dichas muestras sirvieron para realizar inicialmente una descripción petrográfica macroscópica bastante generalizada, mediante el uso de un microscopio binocular estereoscópico marca Motic, modelo K-700L. Posteriormente y luego de una clasificación inicial se seleccionaron un conjunto menor de muestras para realizar estudios microscópicos mucho más detallados, mediante secciones delgadas y probetas pulidas, las que fueron examinadas mediante un microscopio binocular de polarización, marca Olympus modelo BX-50P. Parte de dichas muestras, fueron analizadas en el Laboratorio de Espectrometría de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), mediante los métodos de espectrografía multielemental, análisis químico cuantitativo y difracción de rayos X. De igual manera, fueron seleccionados otro conjunto de muestras, las cuales fueron enviadas a España, para ser estudiadas y caracterizadas por el *Dr. Ricardo Castroviejo*, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid, de cuyas investigaciones y resultados, tuvo la amabilidad de compartir con mi persona, siendo importante para el mejor desarrollo de la presente tesis. Aparte de las habituales pruebas de microscopía, también realizó análisis especializados con microsonda electrónica y difractor de rayos X, parte de cuyos resultados son expuestos aquí.

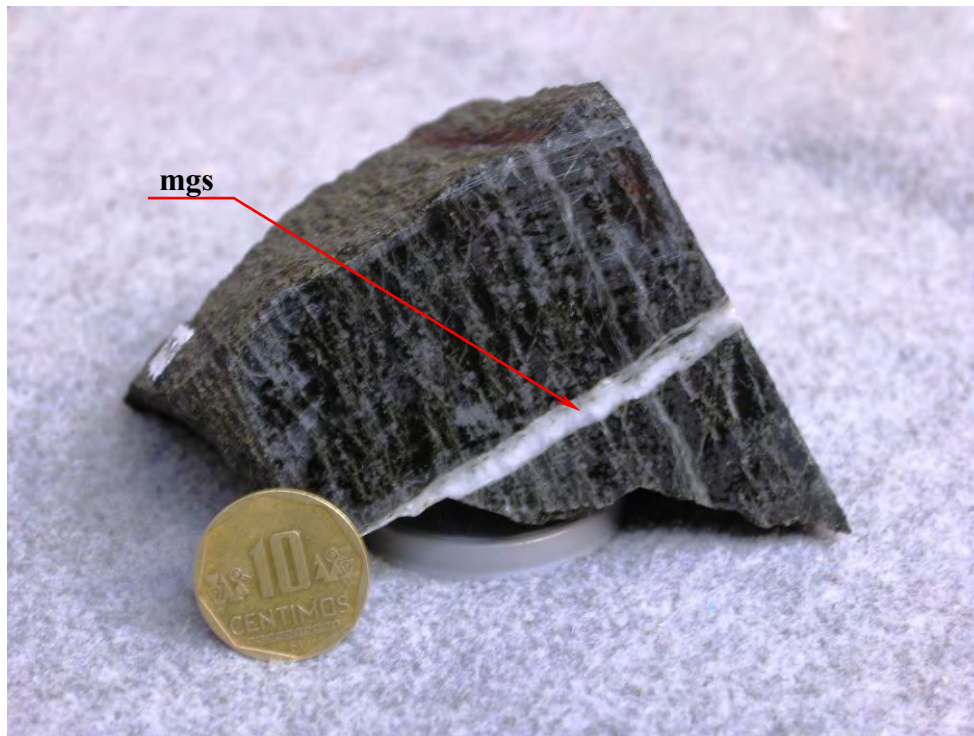
### **5.1 Descripción Macroscópica**

Para realizar la descripción macroscópica de las muestras de mano, recolectadas en el terreno, se ha tomado en cuenta la clasificación generalizada mencionada anteriormente en el capítulo 4, subcapítulo 3; para lo cual se describen las principales características petrográficas presentes (color, textura, etc.). A continuación se tienen las descripciones macroscópicas de las diversas litologías observadas en el terreno.

- **Serpentinita Gris Verdosa**, se identifica por mostrar un color gris verdoso oscuro a casi negro. Por lo general exhibe aparentes capas de foliación (Foto 44), dándole a la roca un aspecto bandeado y con frecuencia cortada por venillas submilimétricas a milimétricas de magnesita de color blanco (Foto 45). En corte, puede presentar una superficie masiva, sin rastros de la textura ígnea primaria, aunque frecuentemente muestra una apariencia granular y en algunas ocasiones hasta brechosa. Se han detectado algunos afloramientos de esta serpentinita, mostrando cierta mineralización de granates (Foto 46) como minerales accesorios. Esta variedad de serpentinita presenta fractura irregular en los bordes y brillo opaco. Se observan algunas estructuras mineralizadas, comúnmente concordantes a la esquistosidad, constituida en su mayoría por magnetita (Foto 47), distribuida en playas irregulares y además de finísimas diseminaciones de sulfuros metálicos. Superficialmente suele presentar recubrimientos e impregnaciones de limonitas pardas a oscuras de aspecto masivo a pulverulento.



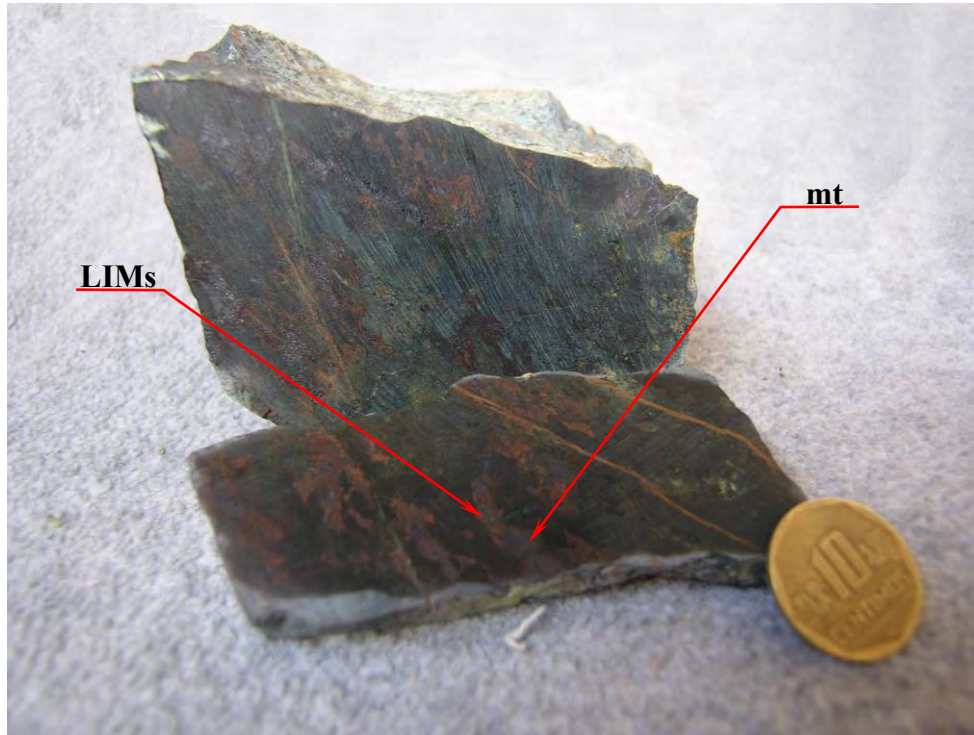
**Foto 44.-** Vista macroscópica de la ‘serpentinita gris verdosa’. Puede observarse claramente su característico aspecto bandeado.



**Foto 45.-** Es posible encontrar con cierta frecuencia, la presencia de venillas con relleno de magnesita (mgs), las cuales suelen cortar a la ‘serpentinita gris verdosa’.



**Foto 46.-** La ‘serpentinita gris verdosa’ mostrando una ocurrencia ocasional de granates (GRNs) como minerales accesorios y Limonitas (LIMs) pulverulentas concordantes con el bandeamiento.



**Foto 47.-** En algunos casos se tienen playas irregulares de magnetita (mt) de aspecto masivo, rodeado por limonitas (LIMs) desde los bordes.

- **Serpentinita Verde Amarillenta**, de color verde claro, mostrando tonalidades que varían de amarillentas a blanquecinas (Fotos 48 y 49); aunque, puede presentar pequeñas áreas de color verde oscuro. Presenta un aspecto aparentemente escamoso, algo menos compacto y sedoso a graso al tacto. No se observan rastros de la textura primaria original, generalmente se encuentra bastante tectonizada, producto de la fuerte deformación penetrativa, dando como resultado la presencia de fracturamientos y plegamientos finos (Foto 50). Debido a esta característica, la serpentinita verde amarillenta presenta superficies bastante suaves y onduladas. Es frecuente encontrarla cortada por finísimas venillas con relleno de magnesita, aunque en ocasiones también por vetillas milimétricas de crisotilo de aspecto fibroso. Puede contener además, pequeñísimas diseminaciones y venillas con relleno de magnetita, asociada a la muy escasa presencia de sulfuros (Foto 51). Cabe mencionar la ocurrencia de **stichtita** (carbonato hidratado de cromo y magnesio) de modo ocasional ligada a cromita muy fina, como relleno de cavidades y relacionadas a las zonas oscuras de la roca.

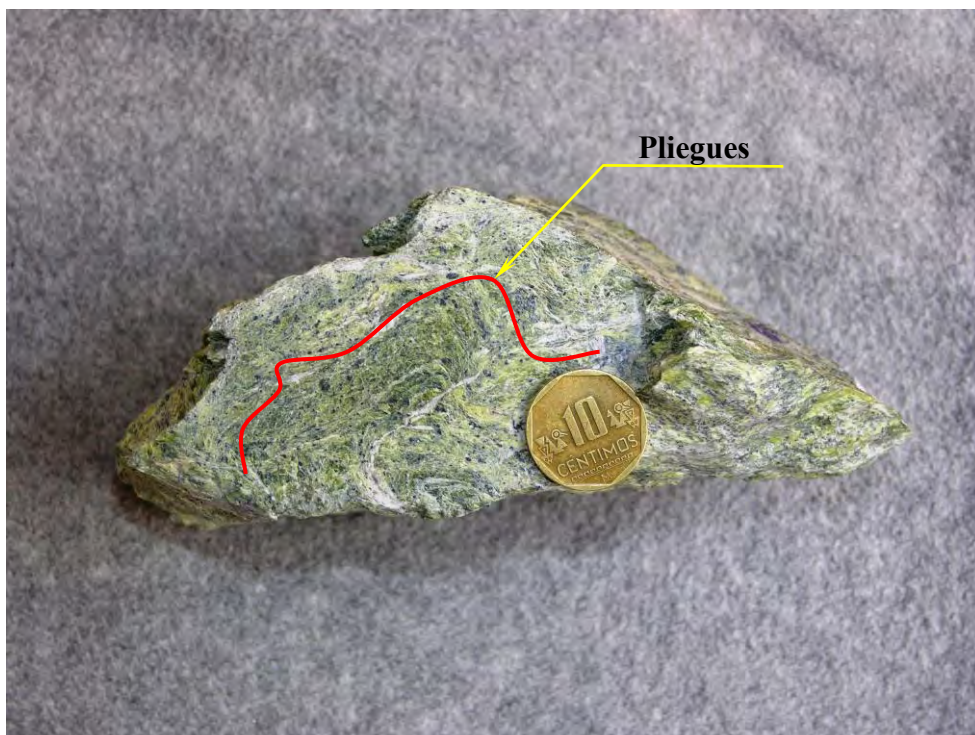
Superficialmente suele presentar de forma frecuente, impregnaciones de talco de color blanquecino y aspecto pulverulento. Como se mencionó anteriormente, en el capítulo 4 subcapítulo 3, esta variedad de serpentinita constituye la típica roca encajonante de los cuerpos mineralizados de cromita.



**Foto 48.-** Muestra de 'serpentinita verde amarillenta', mostrando sus tonalidades blanquecinas debido a la ocurrencia de talco sobre su superficie.

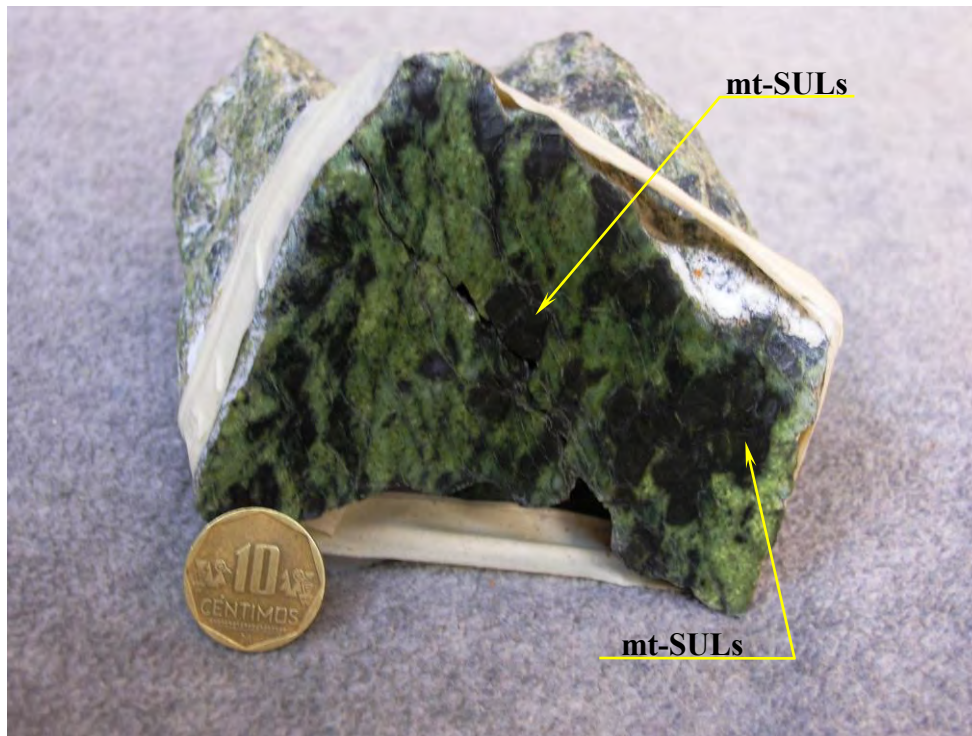


**Foto 49.-** Vista de otra muestra de 'serpentinita verde amarillenta'. El talco se encuentra a modo de impregnaciones recubriendo la roca.



**Foto 50.-** Corte en 'serpentinita verde amarillenta', en la cual es posible observar la fuerte deformación penetrativa, dando como resultado, la presencia de pliegues y fracturas de dimensiones centimétricas a milimétricas.



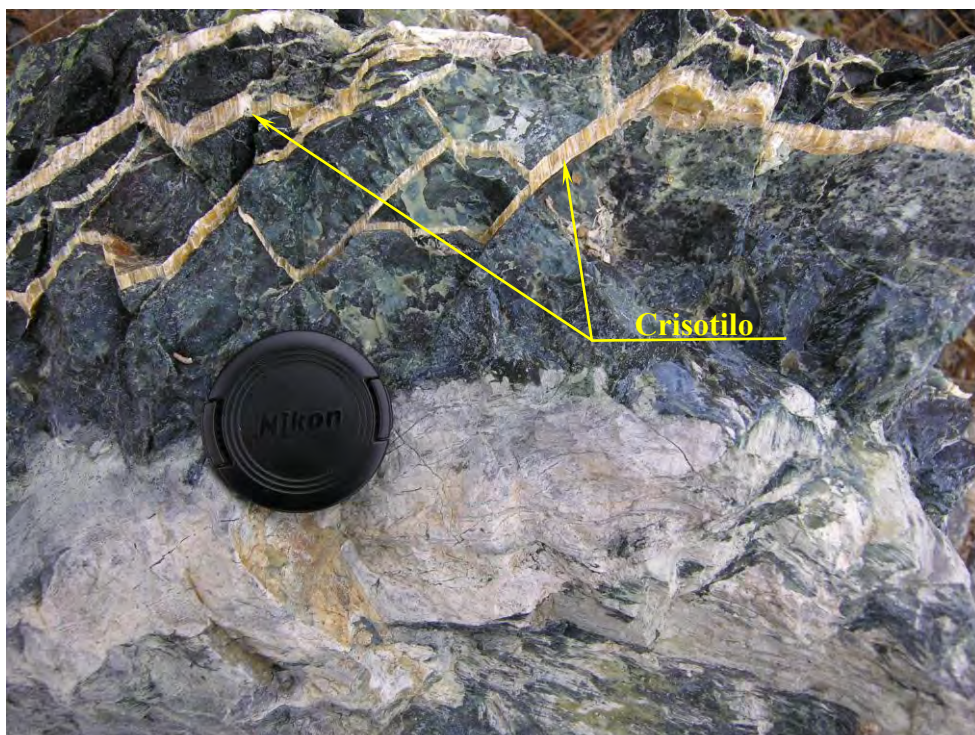


**Fotos 51.-** Corte de otra muestra de ‘serpentinita verde amarillenta’. Finas playas de magnetita (mt) masiva asociada a sulfuros (SULs), restringidas a las partes oscuras de la roca.

- **Serpentinita Verde Botella**, presenta color verde muy oscuro hasta casi negro. No se han observado rastros de la textura primaria original, mostrándose prácticamente masiva, aunque en ocasiones puede observarse ligeramente brechoide y bastante compacta. Se caracteriza por lucir un brillo graso, aunque en superficie de fractura suele aparecer muy lustrosa (Foto 52). Otra referencia importante que identifica a esta variedad de serpentinita, es que al romperla, ésta se separa siguiendo aparentes planos ortogonales y exponiendo bordes bastante filosos y cortantes (Fotos 53 y 54). Ocasionalmente, pueden observarse la presencia de fracturas milimétricas a centimétricas con relleno de crisotilo, exhibiéndose a manera de agregados de fibras paralelas (hábito asbestiforme) de color crema parduzco, mostrando un brillo sedoso (Foto 55). Con frecuencia puede presentar una ligera mineralización de magnetita y cromita con aspecto granular muy fina, mostrándose tanto como playas diseminadas y en algunos casos como rellenos de venillas y fracturas. Muy ocasionalmente se puede observar algunas diseminaciones de sulfuros metálicos.



**Foto 54.-** Imagen de otra muestra de ‘serpentinita verde botella’ de aspecto masivo y planos de fractura casi rectos.

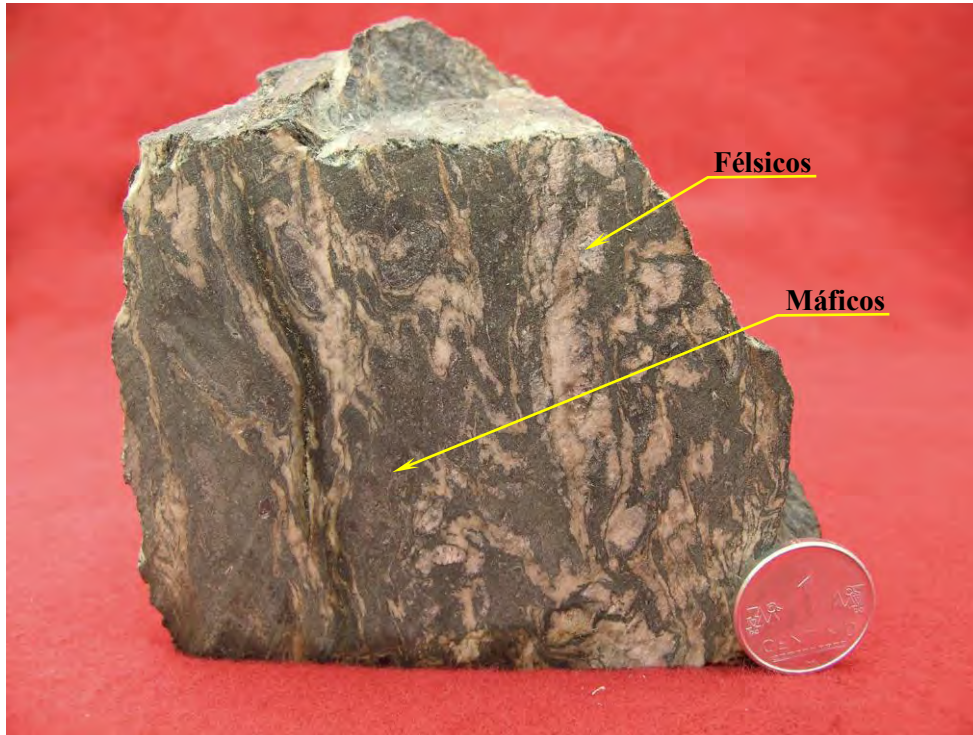


**Foto 55.-** En algunos casos esta variedad de ‘serpentinita verde botella’, se encuentra cortada por fracturas milimétricas a centimétricas con relleno de crisotilo de aspecto fibroso.

- **Anfibolita**, su color varía de verde grisáceo oscuro a gris negruzco, contrastando con un bandeamiento irregular y sinuoso de color blanco a blanco grisáceo (Fotos 56 y 57). Presenta una textura nematoblástica foliada, compuesta esencialmente por finos cristaloblastos aciculares y alargados de anfíboles (bandas oscuras), alternándose con finísimos cristaloblastos de plagioclasas (bandas claras); ambos se encuentran mostrando una orientación preferencial (esquistosidad) de sus blastos (Fotos 58 y 59). Por lo general, estos individuos cristalinos exhiben dimensiones milimétricas a submilimétricas. Se observan recubrimientos de películas superficiales de limonitas pardo-oscuras, producto de la oxidación superficial (alteración supérgena por oxidación). En el capítulo 3, se ha tratado de explicar el origen de estos cuerpos de anfibolitas, postulándose como el resultado del metamorfismo de rocas máficas gabroideas.



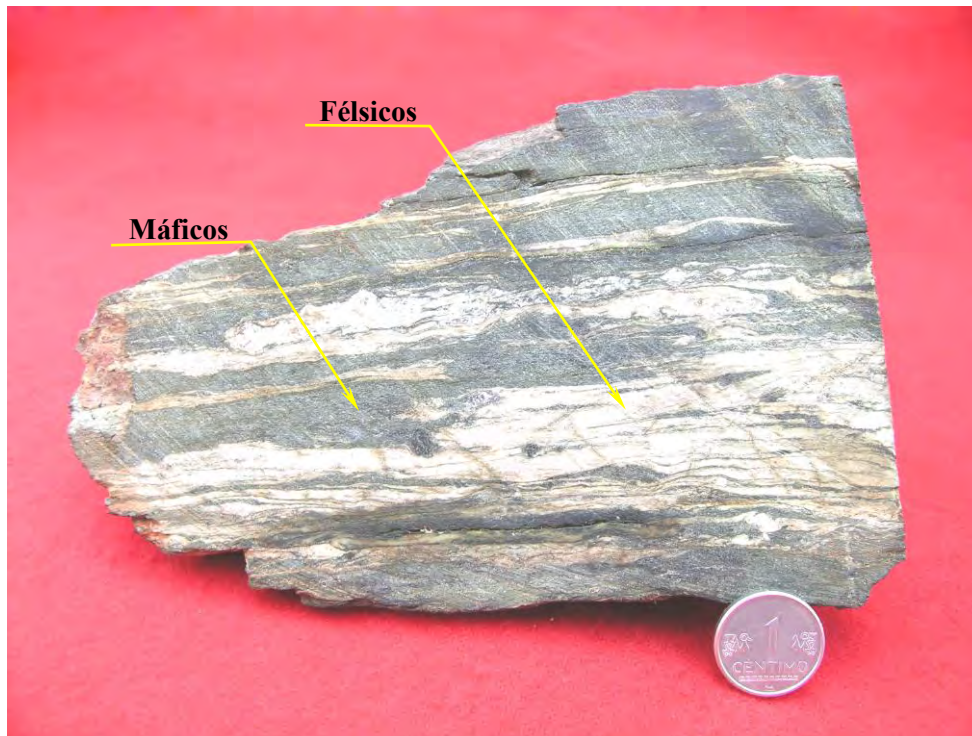
**Foto 56.-** Vista general de una muestra de ‘anfíbolita’, exhibiendo su bandeamiento irregular y sinuoso de minerales máficos y félsicos.



**Foto 57.-** Imagen de un corte transversal a una muestra de 'anfíbolita', luciendo la disposición sinuosa del bandeamiento entre los minerales máficos y félsicos.



**Foto 58.-** Muestra de 'anfíbolita', en la cual se practicó dos cortes perpendiculares, exponiendo claramente su característica textura nematoblástica foliada.



**Foto 59.-** Imagen de una ‘anfibilita’ mostrando un corte longitudinal a la dirección de esquistosidad de la roca.

Cabe destacar la presencia de algunas otras ocurrencias litológicas, presentes en la zona de trabajo, que debido a su escasa influencia y limitada extensión, solo serán mencionados de manera referencial.

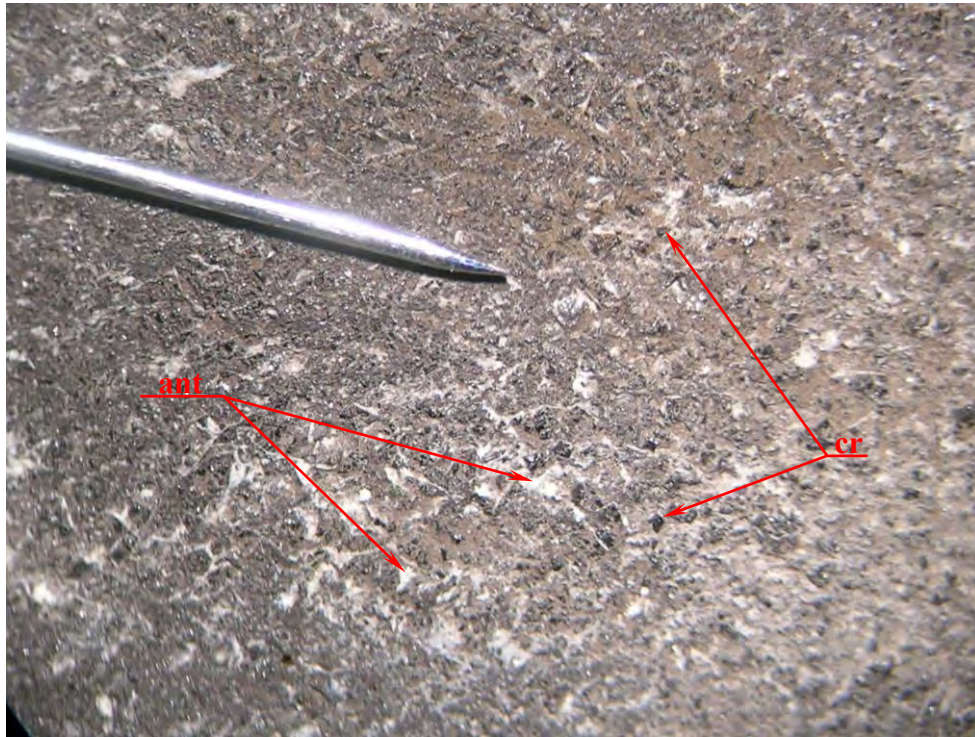
- **Cataclastitas de cromita**, según *Castro* (1989), la podemos considerar como una tectonita, compuesto esencialmente por cromita cristalina, la cual ha sufrido procesos de deformación frágil (cataclasis), originando la rotura y fragmentación de los individuos de cromita, dejándolos generalmente con formas angulosas y dimensiones milimétricas a submilimétricas, dichas características proporcionan a la roca una estructura granular brechoide muy fina (Fotos 60, 61, 62 y 63), unida mediante una matriz de naturaleza serpentínica (antigorita). Debido al alto contenido del mineral cromita, también se le puede clasificar como **cromitita**. Estos cuerpos han sido reconocidos específicamente en el sector denominado La Curva.



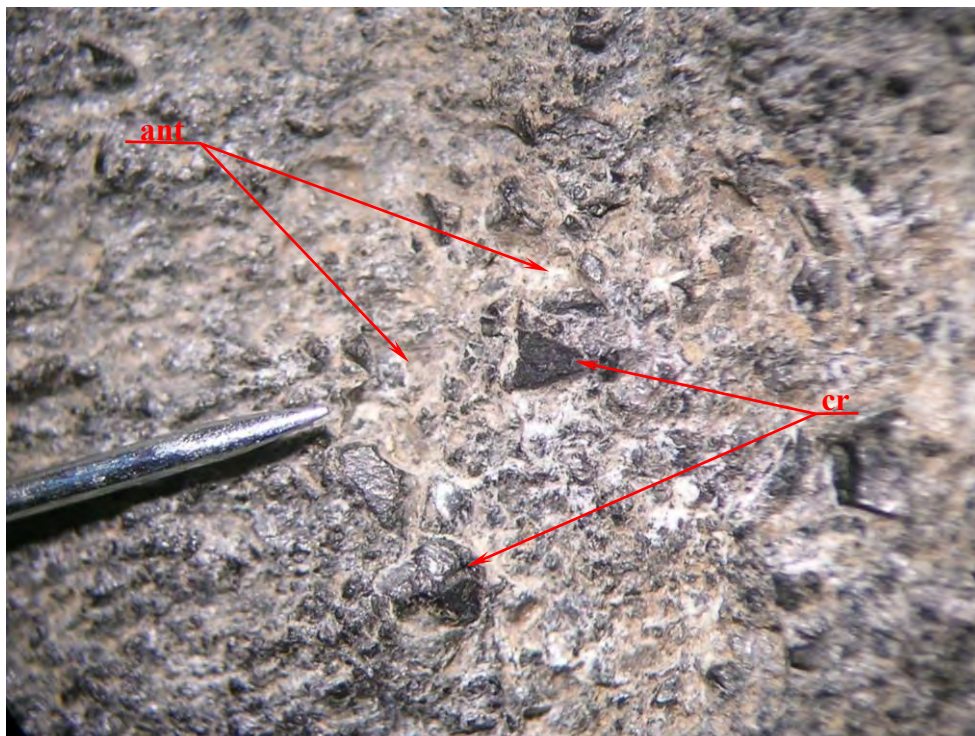
**Foto 60.-** Vista macroscópica de la 'cataclastita de cromita' (cromitita), mostrando su aspecto granular fino de cromita en matriz serpentínica.



**Foto 61.-** Imagen del corte de una 'cataclastita de cromita' (cromitita).

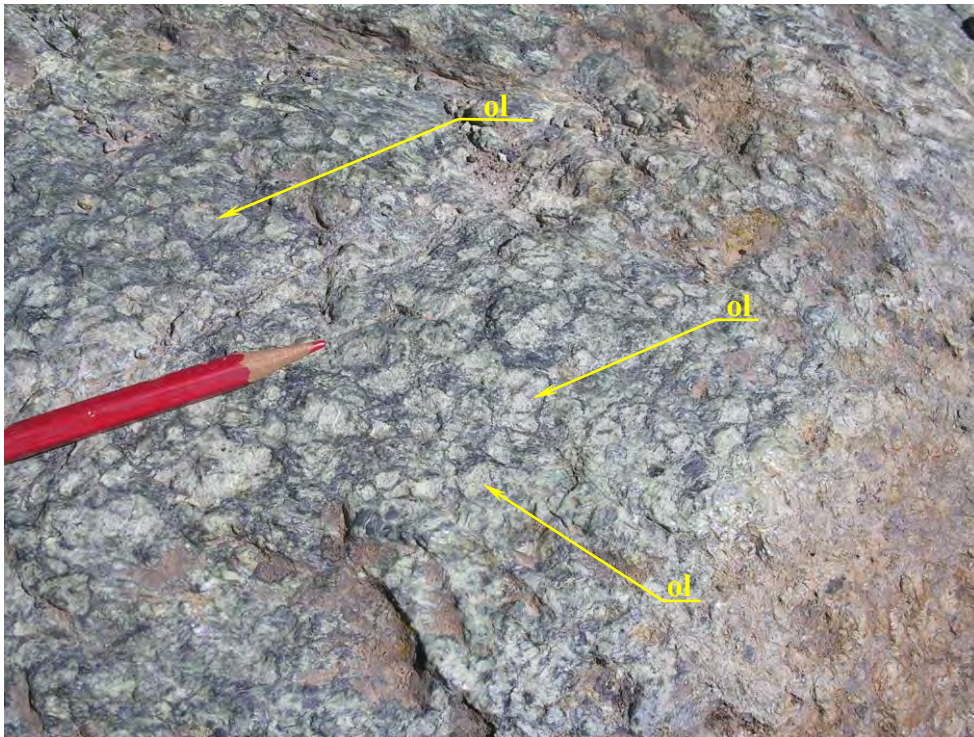


**Foto 62.-** ‘Cataclastita de cromita’ (cromitita) vista al microscopio estereoscópico. Se puede observar los granos fragmentales de cromita (cr), cementadas por serpentina del tipo antigorita (ant).



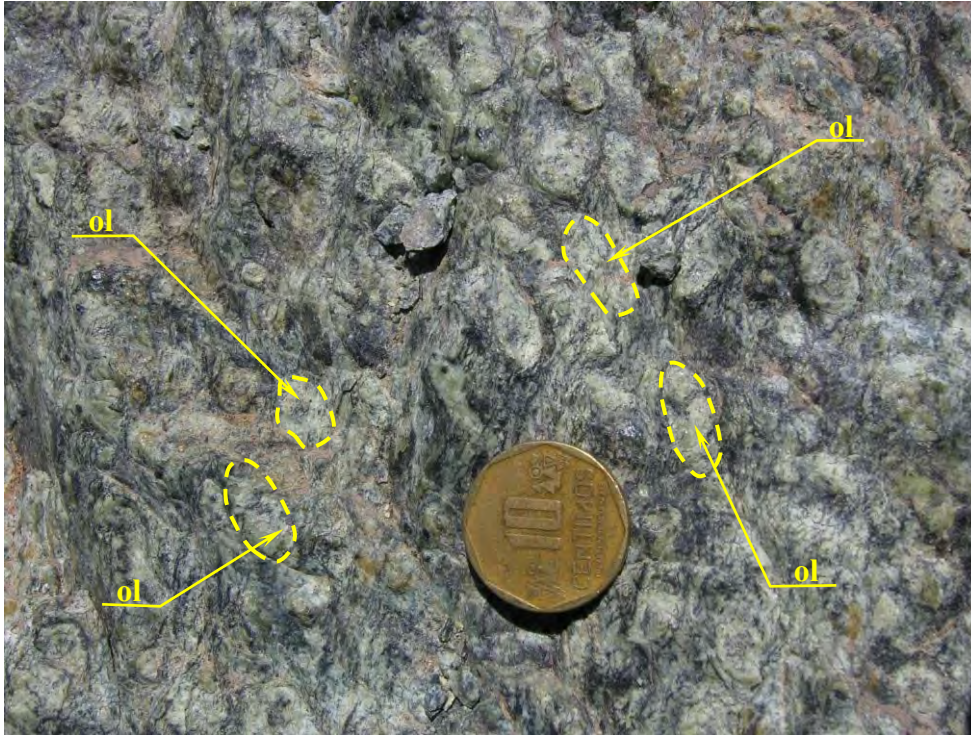
**Foto 63.-** Vista con mayor aumento de la ‘cataclastita de cromita’ (cromitita), mostrando claramente los individuos de cromita (cr) en antigorita (ant).

- **Dunitas**, se han encontrado algunos afloramientos de otra variedad de roca fuertemente serpentinizada, especialmente en la zona de San Felipe. Dicha roca presenta moldes o ‘fantasmas’ de una textura primaria de tipo fanerítica, equigranular y de grano grueso. Los moldes observados corresponden probablemente a cristales xenomórficos de olivino (Fotos 64 y 65) totalmente transformados a serpentina. Estas características sugieren que el protolito ultramáfico, concuerda con una roca de tipo dunítico. Es quizás uno de los pocos indicios identificados para poder caracterizar la naturaleza de las ultramafitas primarias en Tapo.



**Foto 64.-** Serpentinita mostrando moldes de olivino (ol) totalmente alterados hidrotermalmente, sugiriendo una naturaleza dunítica para su protolito.





**Foto 65.-** Vista ampliada donde se observa con claridad la abundancia de los moldes totalmente serpentinizados de olivino (ol), concluyendo que se trata de una dunita hidrotermalmente serpentinizada.

Es necesario indicar que un cartografiado con mayor detalle y que permita encontrar rocas con menor grado de alteración, posibilitaría una mejor clasificación y determinación de la litología presente en el Macizo de Tapo.

## 5.2 Identificación Microscópica de las Menas y Gangas

Primeramente se debe tener en cuenta que la cromita pertenece a los óxidos del grupo mineralógico de la **espinela**, cuya fórmula general es  $A^{2+}B^{3+}_2O_4$ , donde A y B están conformados por los siguientes cationes divalentes y trivalentes:

**A:**  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ .

**B:**  $Al^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $V^{3+}$ .

Dando origen entre otros minerales cúbicos:

- Espinela	$MgAl_2O_4$	- Jacobsita	$(Mn^{2+}, Fe^{2+}, Mg)(Fe^{3+}, Mn^{3+})_2O_4$
- Cromita	$Fe^{2+}Cr_2O_4$	- Galaxita	$(Mn^{2+}, Fe^{2+}, Mg)(Al, Fe^{3+})_2O_4$
- Magnetita	$Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$	- Franklinita	$(Zn, Mn^{2+}, Fe^{2+})(Fe^{3+}, Mn^{3+})_2O_4$
- Magnesioferrita	$MgFe^{3+}_2O_4$	- Cocromita	$(Co, Ni, Fe^{2+})(Cr, Al)_2O_4$

La **cromita** constituye el único mineral de mena reconocida para la producción industrial del cromo. Los estudios tradicionales establecen una fórmula química general  $Fe^{2+}Cr_2O_4$ ; adicionalmente *Ramdohr* (1969) investigó más a fondo la naturaleza del mineral estableciendo la siguiente fórmula  $(Fe^{2+}, Mg)(Cr, Al, Fe^{3+})_2O_4$ , pudiendo existir en ella, una amplia sustitución en los diferentes cationes involucrados e incluyendo a la vez pequeñas cantidades de Mn, Zn, Ti, etc.

Tanto *Schouten* (1962) como *Uytenbogaardt & Burke* (1971), describen ciertas propiedades ópticas de la cromita, proponiéndolas como características distintivas útiles para su caracterización:

- **Color:** gris con ligero tinte parduzco.
- **Reflectancia:** baja (aproximadamente 12 %), siendo aún más baja que la magnetita (20 %) y la esfalerita (18 %).
- **Dureza:** alta (mayor que la magnetita pero menor que la hematita).
- **Anisotropía:** siempre es isótropa, aunque se han reportado que ciertas variedades ricas en Zn pueden mostrar una débil anisotropía. También es necesario comentar la presencia de una débil anisotropía anómala, mostrada tanto en cristales zonados así como en aquellos que han sufrido una cierta deformación en su estructura.
- **Reflexiones Internas:** de color marrón a marrón rojizo en individuos ricos en Mg y Al, pero ausente en las cromitas ricas en Fe. Puede ser fácilmente observado mediante el uso de objetivos de inmersión en aceite; aunque por lo general solo es necesario una fuerte iluminación incidente.

En Tapo, se ha podido reconocer dos tipos de concentraciones de cromita, las primeras a manera de cuerpos masivos con dimensiones decamétricas a métricas (Foto 66), cuyas características fueron descritas con detalle en el capítulo anterior (nódulos elongados, vetiformes y estratiformes), hallándose prácticamente agotados en superficie y las segundas se presentan a nivel de delgados horizontes, compuestos de finos granos de aspecto detrítico, mostrando dimensiones milimétricas a submilimétricas de cromita; probablemente relacionados a zonas de esfuerzos, siendo frecuente encontrarlos algo compactados en algunas áreas de las serpentinitas, estando asociadas especialmente a las de tipo verde amarillenta (Foto 67).



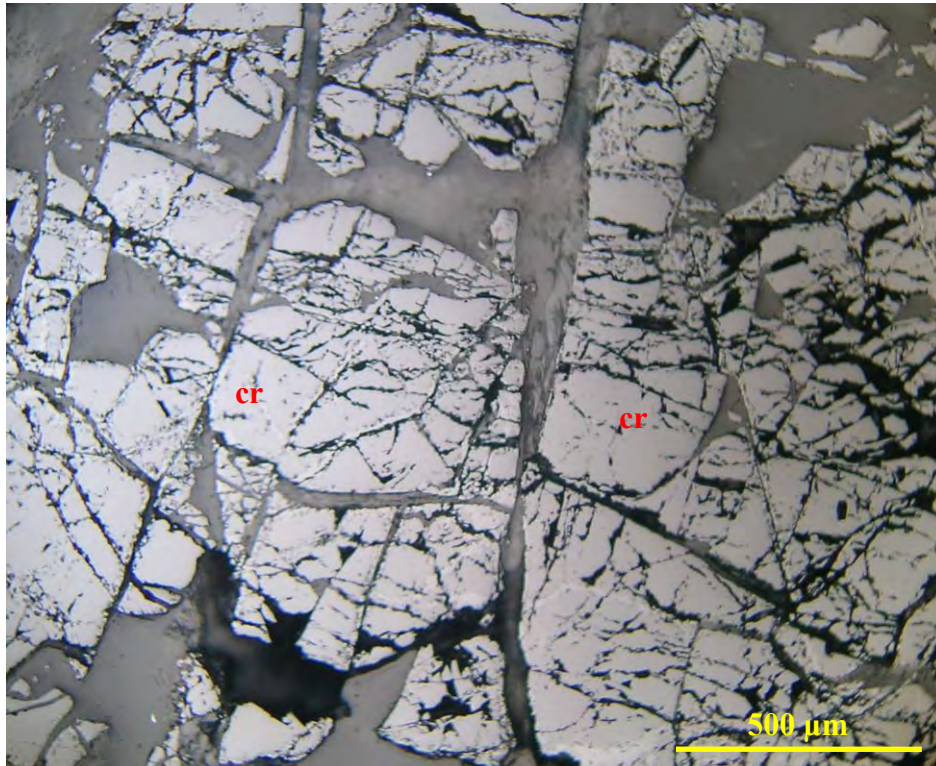
**Foto 64.-** Uno de los modos de ocurrencia para las concentraciones de cromita, es mostrarse a manera de nódulos alargados ('boudins'), a veces tabulares.



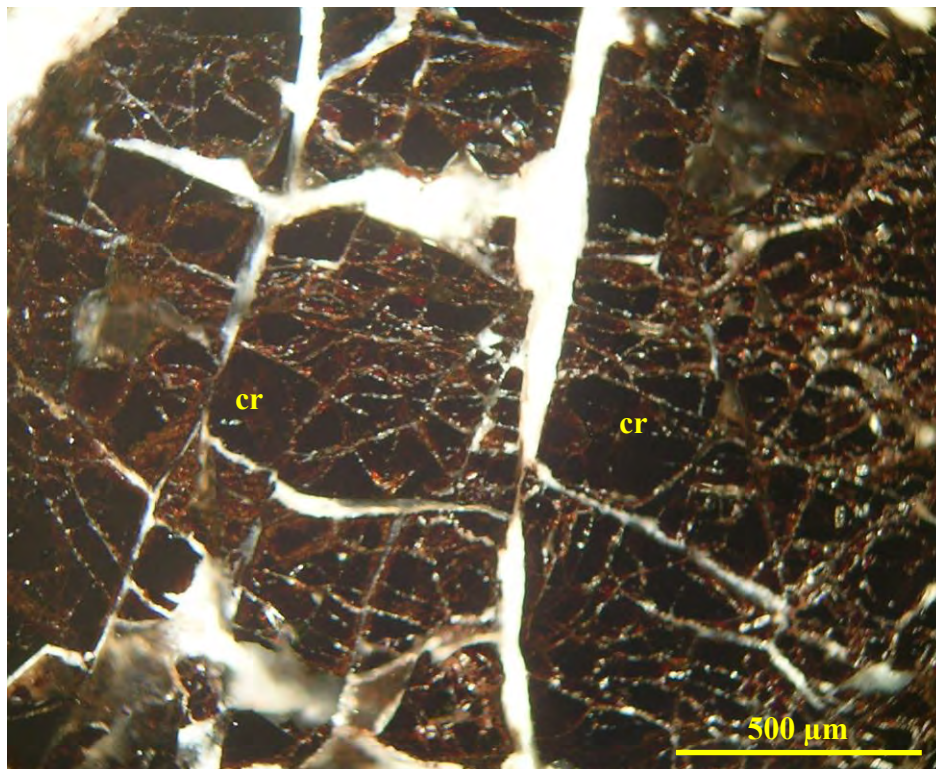
**Foto 64.-** La cromita puede también ocurrir, a manera de finas diseminaciones granulares milimétricas de aspecto detrítico en las serpentinitas.

En ambos casos, la mineralogía tiende a ser similar y relativamente sencilla (Castroviejo *et al.*, 2009). Utilizando ambos métodos de iluminación para el microscopio de polarización, fue posible reconocer a los individuos de cromita, diferenciando las dos formas de ocurrencia.

La más común, constituye parte de los grandes cuerpos (nódulos elongados o “boudins”) de cromita, caracterizándose por mostrar un fracturamiento algo cerrado sin mostrar orientación preferencial alguna (Fotos 68, 69, 70 y 71), pueden presentar desde una alteración débil hasta llegar a un total reemplazamiento a **magnetita** ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ ) e incluso a **ilmenita** ( $\text{FeTiO}_3$ ) y cuando ésta se manifiesta, es posible reconocerla tanto desde los bordes del individuo, así como también en los bordes de las fracturas.

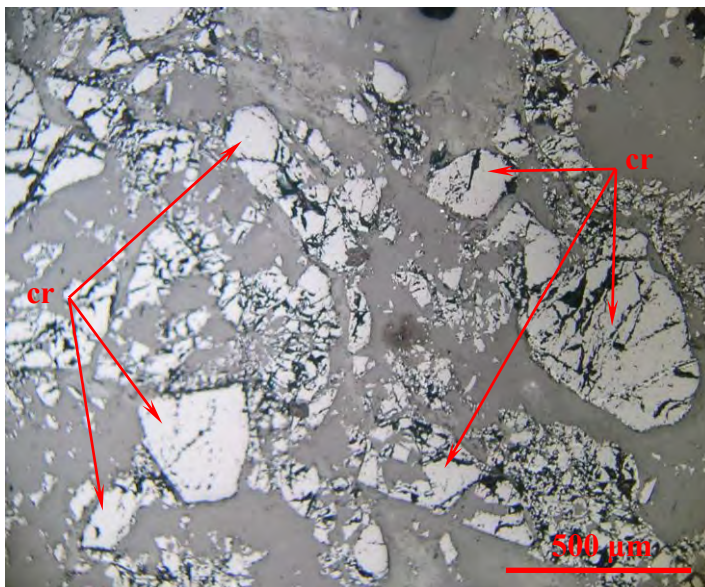


**Foto 68.-** (LR-N/s) Cromita (cr) gris con débil tono parduzco, inalterada y muy craquelada.

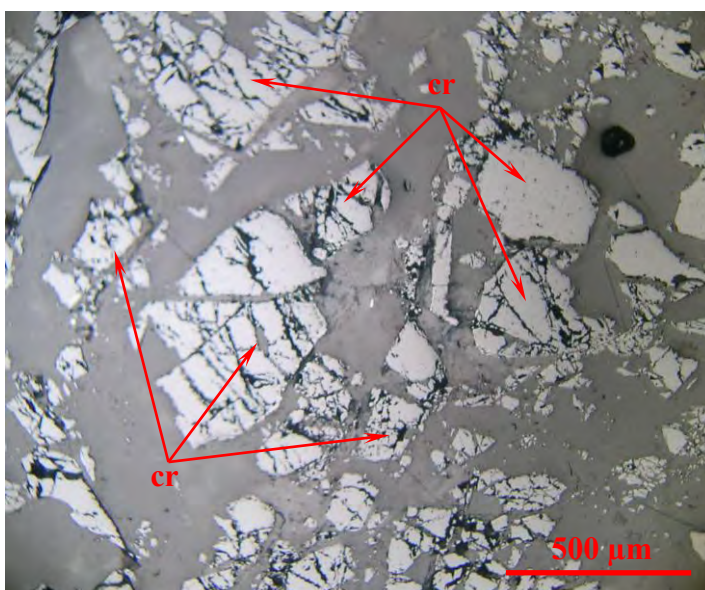


**Foto 69.-** (LR-NXs) La misma vista luciendo sus reflexiones internas de color marrón oscuro.

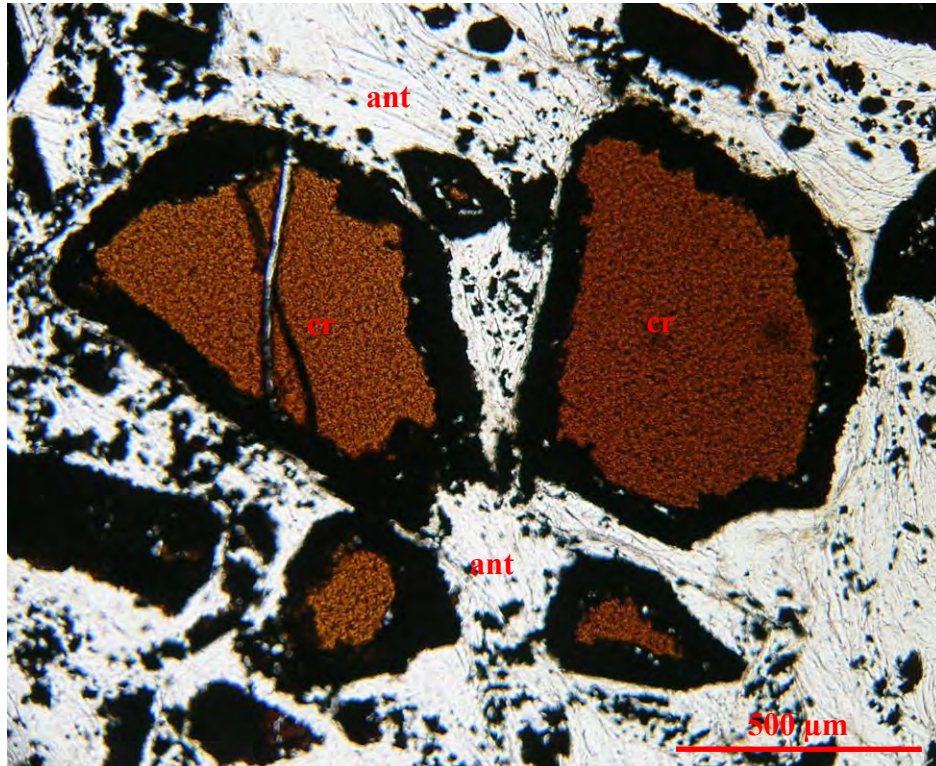
El segundo tipo de ocurrencia forma parte de las cataclastitas de cromita o cromititas, ya descritas anteriormente, mostrando las características de una textura cataclástica, en los cuales, los granos xenomórficos de cromita se muestran por lo general, muy craquelados (Fotos 72 y 73), diseminados (aislados) e inmersos en una matriz compuesta esencialmente por serpentinas de la variedad antigorita (Fotos 74 y 75). Los granos de cromita observados, presentan desde una incipiente a débil alteración a magnetita rodeando sus bordes, a manera de coronas de minerales opacos (Foto 74).



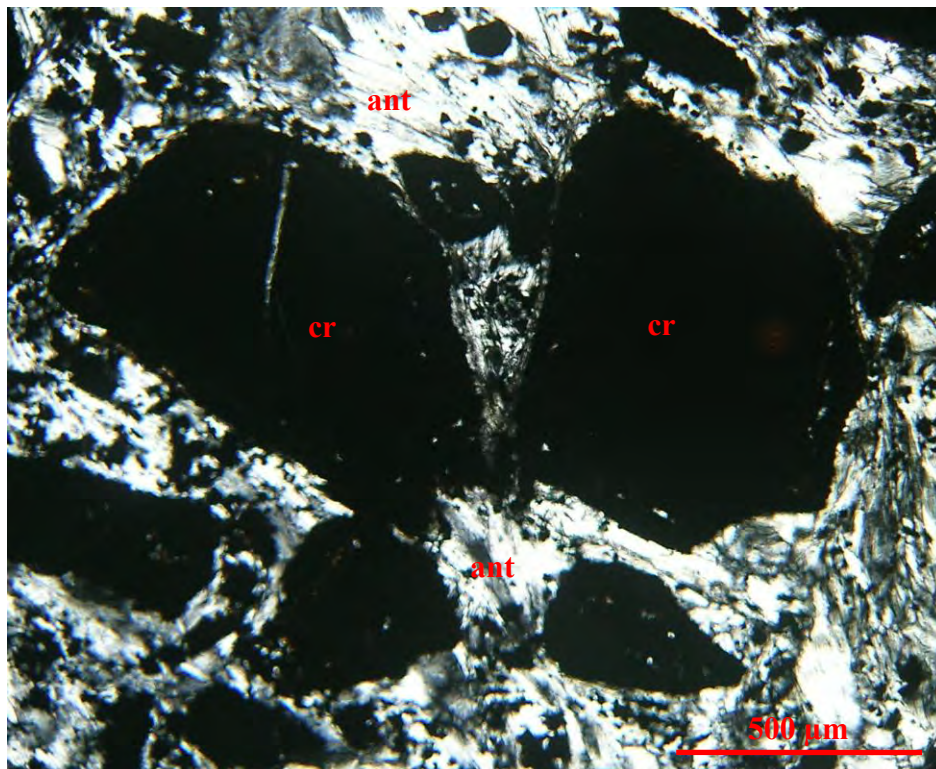
**Foto 72.-** (LR-N//s) Clastos de cromita (cr) muy fracturados, la alteración de los bordes es muy fina y por su color es casi imperceptible.



**Foto 73.-** (LR-N//s) Otra vista similar a la anterior, mostrando los clastos de cromita (cr) muy fracturada en matriz serpentinizada.



**Foto 74.-** (LT-N//s) Clastos angulosos de cromita (cr) diseminada de color marrón, mostrando bordes alterados a minerales opacos.



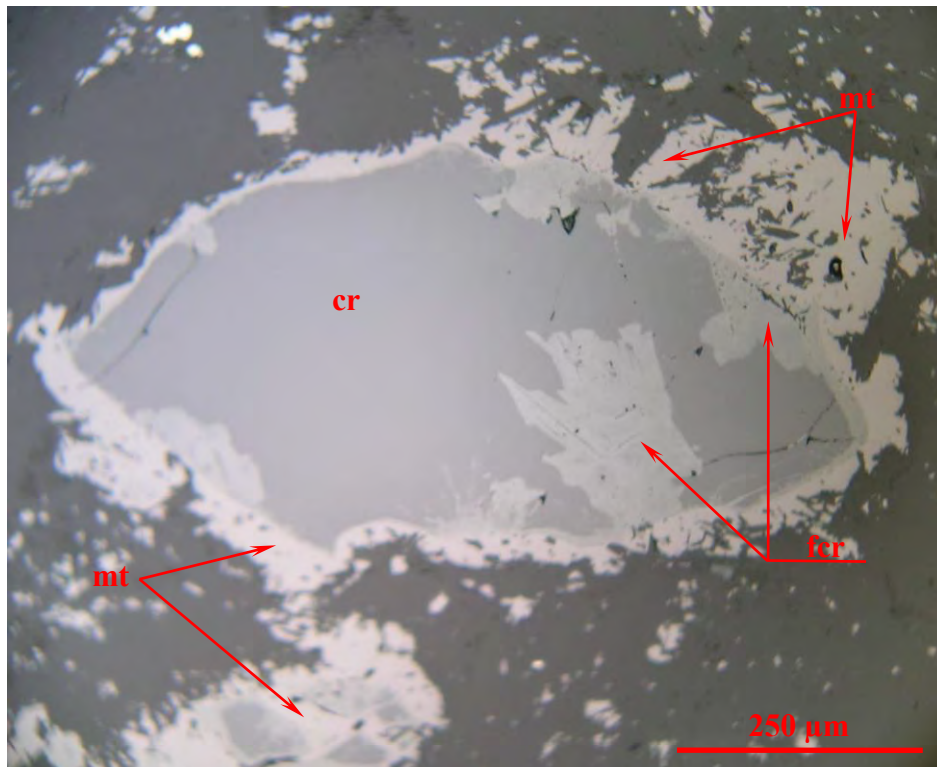
**Foto 75.-** (LT-NXs) La misma vista mostrando el comportamiento isótropo de la cromita (cr) y el hábito hojoso de la antigorita (ant).

Observaciones más detalladas demuestran que las espinelas crómicas de Tapo, son afectadas por un proceso de alteración progresivo, desde sus bordes externos hacia el interior del grano, desarrollándose en menor medida por las zonas de fractura. Dicha zona interna (núcleo) está constituida por cromita de color gris parduzco, limitada por contornos bastante irregulares y nítidos de una zona de color gris verdosa, algo más reflectante e isotropa, la cual según estudios recientes (*Fanlo et al.*, 2009), fue caracterizada como **ferritcromita** (“**ferritchromite**”, en inglés), siendo considerada como una fase intermedia entre la cromita y la magnetita. *Acevedo et al.*, (1999) estudian esta fase, estableciendo la siguiente fórmula química para la ferritcromita  $(\text{Fe}^{2+}_{6,75}\text{Mg}_{1,04}\text{Mn}_{0,13}\text{Ni}_{0,05}\text{Ca}_{0,03})(\text{Fe}^{3+}_{8,08}\text{Cr}_{7,49}\text{Al}_{0,34}\text{Ti}_{0,09})\text{O}_{32}$  que a juzgar por su posición textural en las muestras, además de sus valores en Al-Cr-Fe, se trataría más bien, de una magnetita crómica típica de serpentinitas de bajo grado. La ferritcromita se encuentra en contacto nítido con magnetita hacia los bordes del grano, mostrándose ésta de un color gris débilmente rosáceo (en contacto con la ferritcromita), debido a su contenido de titanio, siendo más reflectante que las fases anteriores e igualmente isotropas. *Monterrubio* (1991), afirma en su tesis doctoral, que estos cambios composicionales se producen como consecuencia de la serpentinitización y del metamorfismo, el cual da lugar a la reacción de la magnetita con la cromita.

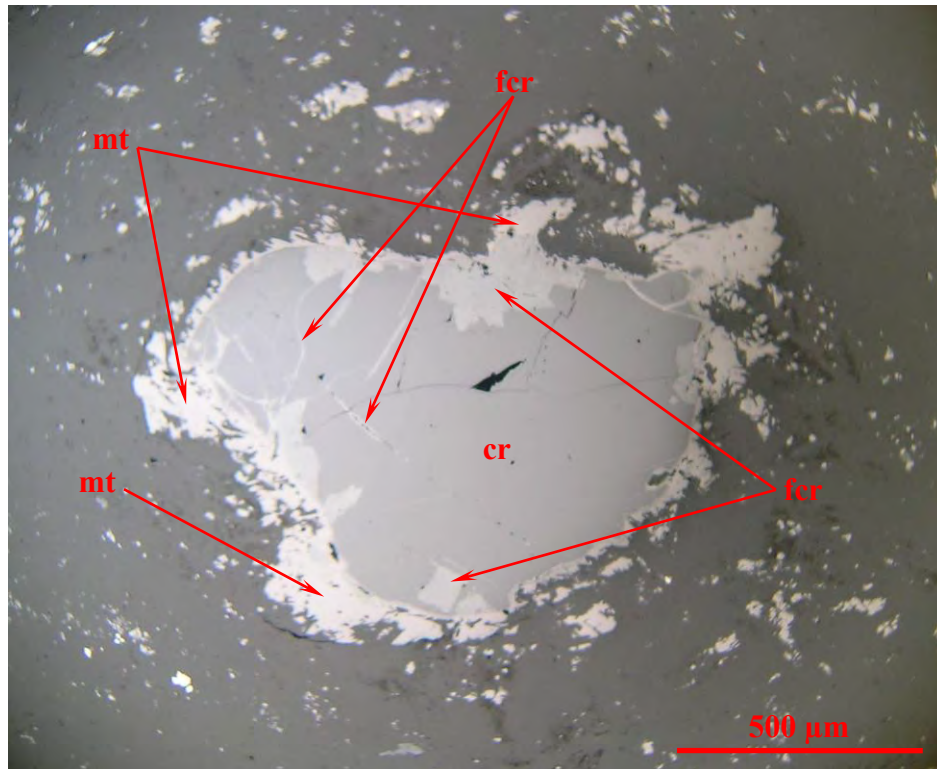
En las fotos 76, 77, 78 y 79; puede observarse el desarrollo de la ferritcromita, tanto alrededor y del mismo modo, a través de los finísimos planos de fractura de los individuos de cromita. La magnetita se presenta siempre en los bordes del grano y en contacto intersticial con las serpentinitas (Fotos 76 y 77), puede contener inclusiones posiblemente de filosilicatos provenientes de las serpentinitas.

En algunos casos la alteración (reemplazamiento) de la cromita es tan intensa, que solo quedan algunos relictos de su presencia. La ferritcromita también se muestra bastante inestable transformándose finalmente en magnetita (Fotos 78 y 79).





**Foto 76.-** (LR-N//s) Cromita (cr), cuyos bordes muestran su zonamiento por alteración a ferritcromita (fcr) y magnetita (mt).

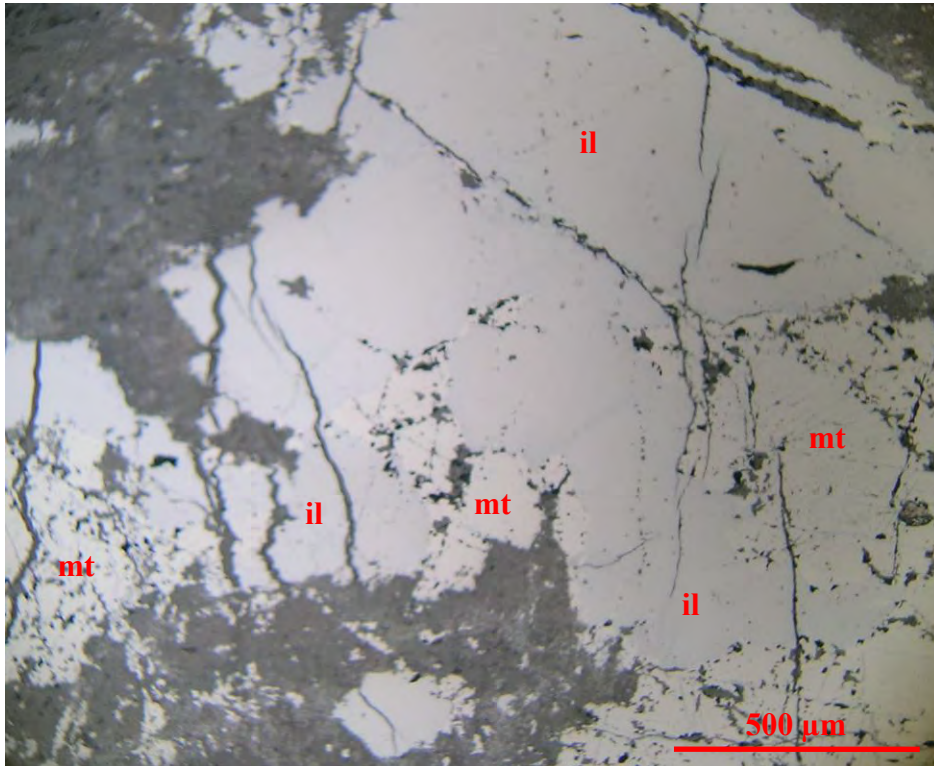


**Foto 77.-** (LR-N//s) Cromita (cr), rodeado por ferritcromita (fcr) en sus bordes y fracturas y este a su vez limitado por magnetita (mt).

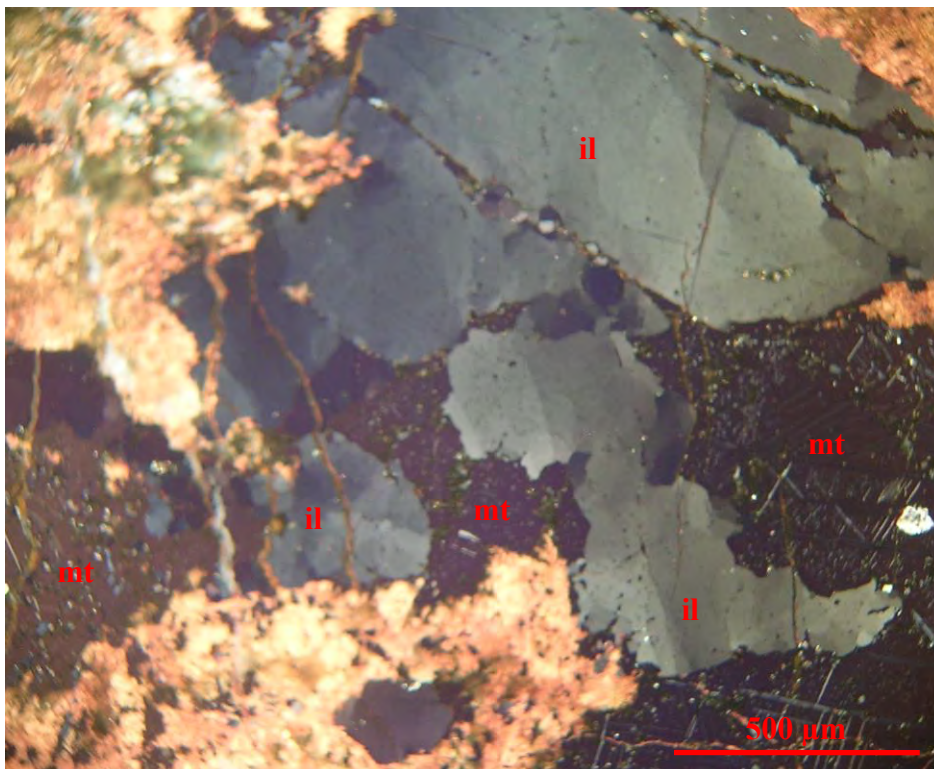
La presencia de ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) es bastante frecuente, especialmente en las serpentinitas gris verdosa, desarrollándose como playas irregulares de color gris parduzco, ligeramente más oscuro que la magnetita (Fotos 82 y 84) y en la mayoría de los casos siempre asociado a ésta. Al colocar el analizador en secuencia, la ilmenita muestra una fuerte anisotropía de color gris verdoso a gris parduzco, mostrando casi siempre una clara extinción ondulante; debido a la deformación de su estructura, posiblemente como resultado de las altas presiones a la que estuvieron sometidas inicialmente las rocas serpentinizadas. Otra forma de manifestación de la ilmenita, es a manera de finas exsoluciones lamelares paralelas que siguen las direcciones de partición de tipo octaédrico (111); logrando manifestarse como individuos pseudomorfizados de ilmenita en espinelas (posiblemente cromita o magnetita, ver fotos 80 y 81); *Castroviejo* (2006) sugiere a los procesos de metasomatismo, como responsable de la desaparición de la probable cromita. De manera similar al caso anterior, la ilmenita también se manifiesta asociada a los individuos de magnetita (Fotos 83 y 85), como finas exsoluciones lamelares paralelas a la dirección (111) mostrando un patrón triangular (*Ineson*, 1989).

En ocasiones es algo complicado distinguir a la ilmenita de la magnetita, por lo que ciertas características distintivas serán muy útiles para poder diferenciarlas. Entre las principales características podemos mencionar:

- La dureza de la ilmenita es mayor que la magnetita.
- La fuerte anisotropía de la ilmenita contrastando con la isotropía de la magnetita.



**Foto 84.-** (LR-N//s) Playas anhedrales de ilmenita (il) intercrecida con magnetita (mt) también anedral. La zona gris oscura son minerales de ganga.



**Foto 85.-** (LR-NXs) Misma vista anterior. La anisotropía y extinción ondulante de la ilmenita (il) comparada con la magnetita (mt).

La presencia de sulfuros es bastante escasa y casi siempre muy dispersa, encontrándose asociada tanto a los minerales de mena (opacos) como a las gangas (transparentes). Tienden a presentarse en intercrecimientos mayormente de tipo corona e intersticial y ocasionalmente en finísimas venillas.

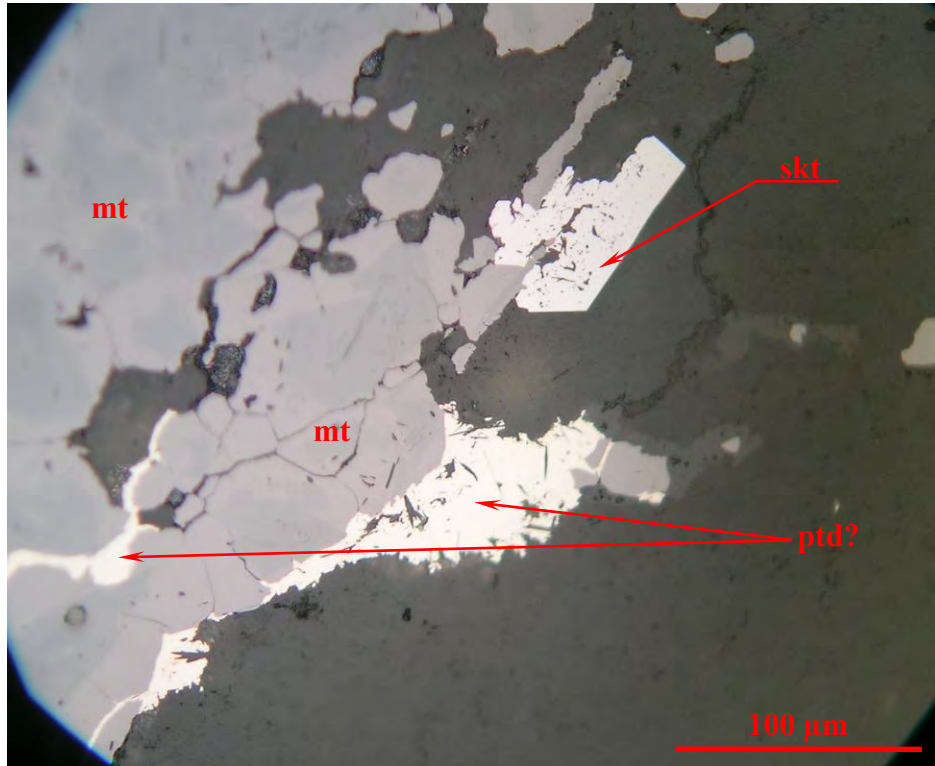
Aparentemente y con mucha dificultad se ha podido determinar hasta cinco variedades entre sulfuros y arseniuros, lo que debido a los medios ópticos disponibles, sumados a la escasez de individuos y las finas dimensiones observadas (por lo general menor a las 100  $\mu\text{m}$ ); hace muy difícil poder llegar a precisar con cierta exactitud el tipo de mineral correspondiente. Bajo esta premisa, se debe aclarar que puede existir alguna probabilidad de error en la clasificación de estos minerales opacos.

En las muestras analizadas, se han podido determinar la presencia de los siguientes sulfuros:

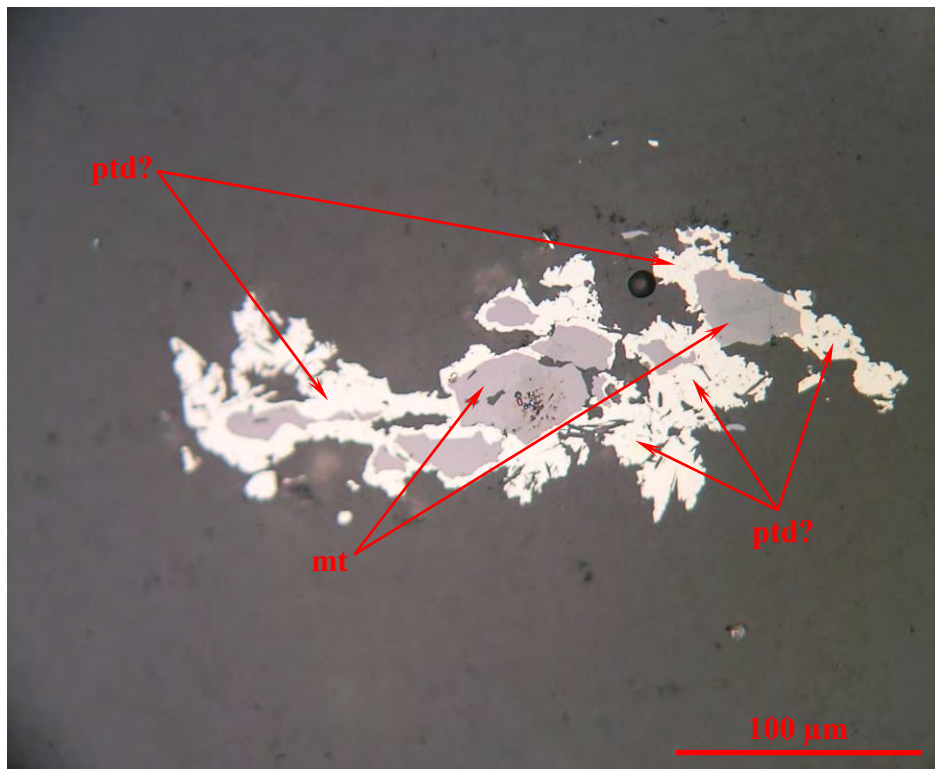
- Pirita	$\text{FeS}_2$	- Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$
- Pentlandita	$(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$	- Pirrotita	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}$
- Skutterudita	$(\text{Co},\text{Ni},\text{Fe})\text{As}_3$		

Las siguientes fotomicrografías describen de manera gráfica los tipos de ocurrencias mineralógicas y sus relaciones entre sí. La foto 86 muestra parte de un cristal de **skutterudita**, perteneciente al grupo de los arseniuros blancos, según *Febrel* (1970) es difícil poder diferenciarla de la **gersdorffita** de fórmula  $(\text{Ni},\text{Co},\text{Fe})\text{AsS}$  pues son muy similares entre sí incluso con respecto a su dureza.

La **pentlandita**, es por lo general de color crema claro, aunque en las fotos donde ésta es reconocida (especialmente la foto 87) puede llegar a casi blanco, debido a que su observación solo es posible con lentes objetivos de 50X, el cual concentra una mayor cantidad de luz en el campo observado, distorsionando de esta manera las observaciones correspondientes; especialmente las realizadas al colocar el analizador en secuencia. *Castroviejo* (2006), sugiere la presencia de **linneita** de fórmula  $(\text{Co},\text{Ni},\text{Fe},\text{Cu})_3\text{S}_4$ , de color blanco con ligero tinte rosáceo, pero debido a las limitaciones antes mencionadas, no ha sido posible poder reconocerlos.



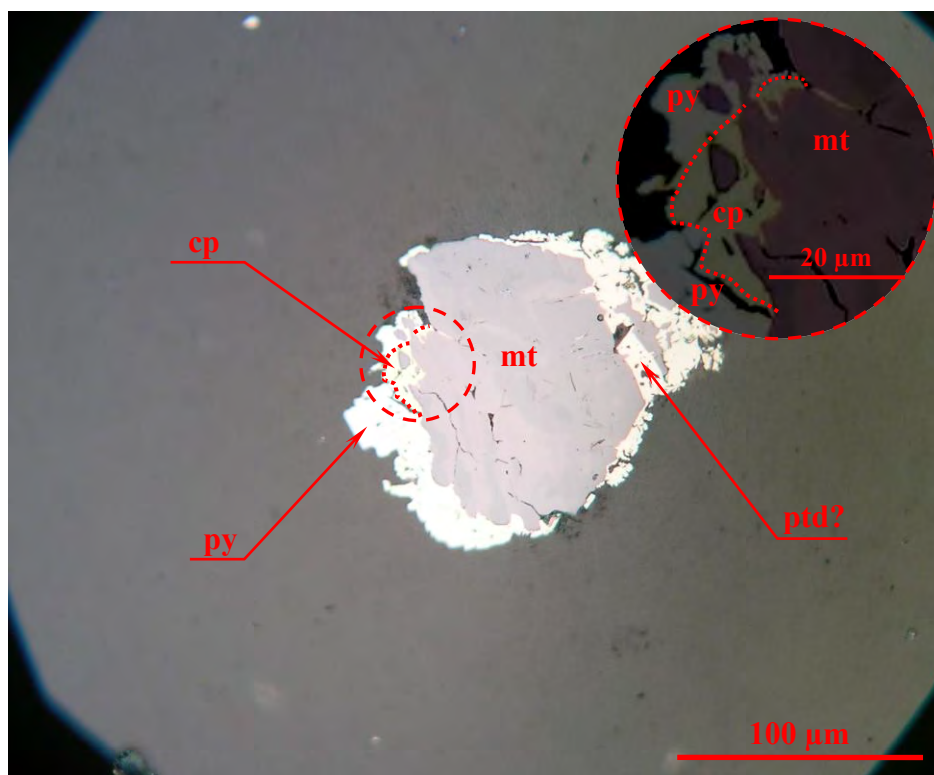
**Foto 86.-** (LR-N//s) Cristal subhedral de skutterudita (skt), playas y venillas de pentlandita? (ptd?), ambas asociadas a magnetita (mt).



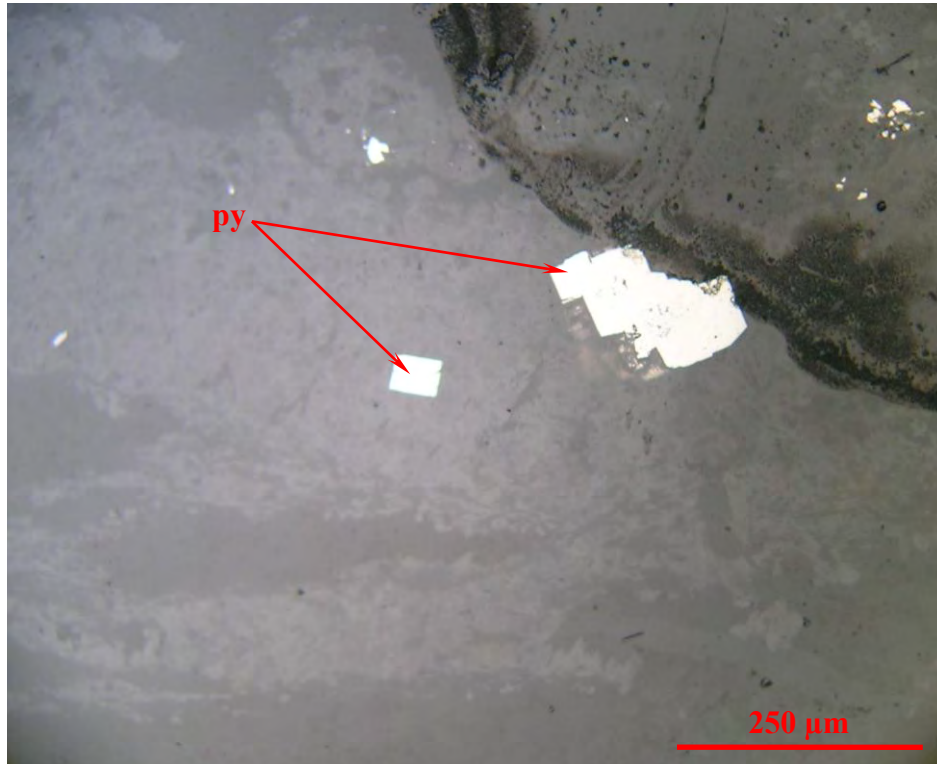
**Foto 87.-** (LR-N//s) Granos de magnetita (mt) anhedral, rodeados totalmente por coronas de pentlandita? (ptd?).

Lo mismo sucede en la foto 88, donde al microscopio se ha podido distinguir un diminuto individuo de **calcopirita** asociada a pentlandita, pero el cual casi no es perceptible en la imagen debido a la alta concentración de luz proveniente de la fuente luminosa. Incluso se puede apreciar que los cristales de pirita (Fotos 88 y 89) se muestran de color muy blanco pudiendo ser confundida con otra especie mineral.

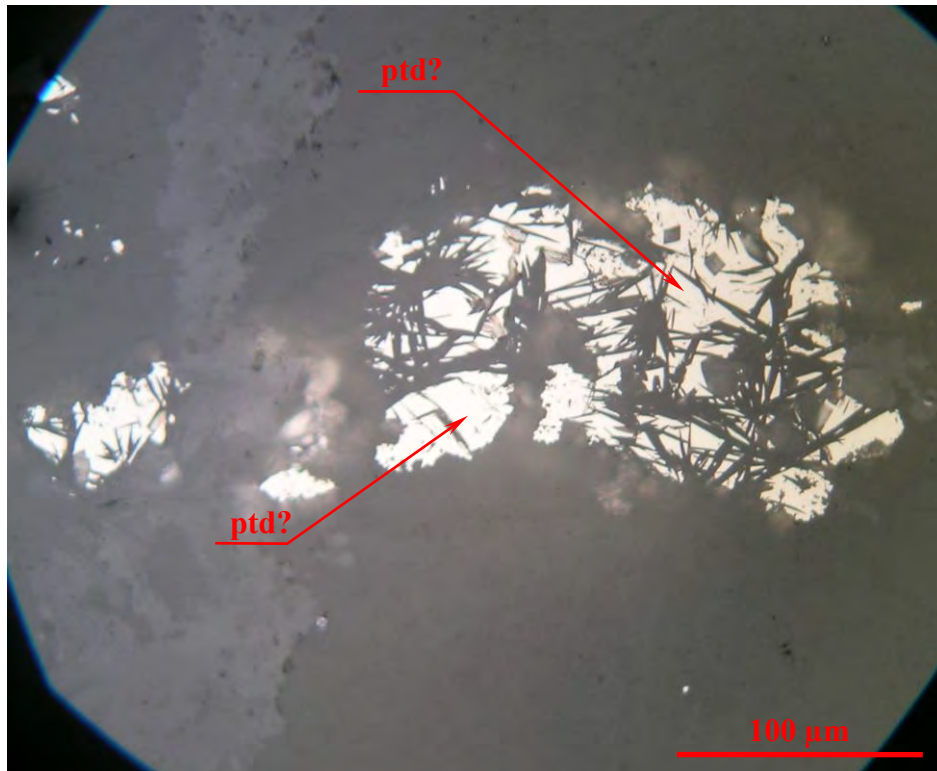
En la foto 90 se puede advertir, el desarrollo intersticial de la posible pentlandita entre los individuos de aspecto hojoso, posiblemente parte de los minerales serpentinizados de la roca caja.



**Foto 88.-** (LR-N//s) Grano de magnetita (mt) rodeada con corona compuesta por pentlandita? (ptd?), pirita (py) y calcopirita (cp). Al lado superior derecho se tiene una ampliación de la imagen con una disminución del brillo, donde se aprecia con mayor claridad la presencia de calcopirita (cp) asociada a la pirita (py) en el borde de la magnetita (mt).



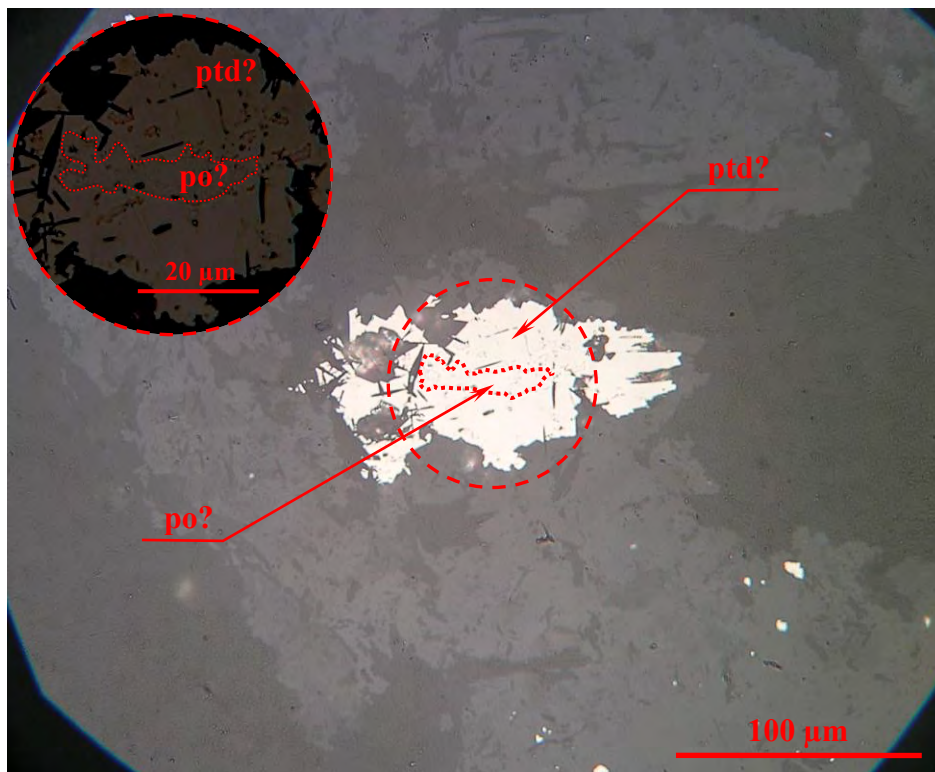
**Foto 89.-** (LR-N//s) Cristales euhedrales de pirita (py) mostrando sus típicas formas cúbicas.



**Foto 90.-** (LR-N//s) Cristales anhedrales de pentlandita? (ptd?) con desarrollo intersticial, entre las gangas de hábito acicular a fibroso.

En la foto 91, se puede apreciar un grano de pentlandita cuyo núcleo fue delimitado por presentar otra fase mineralógica incluida en ella, aparentemente podría corresponder a una **pirrotita**, producto de la alteración de la pentlandita.

Debemos tener en cuenta que para un estudio minerográfico de secciones pulidas, es recomendable el uso de lentes objetivos de hasta un aumento de 20X (incluso es posible usar los de 25X); pero usar un lente objetivo de mucho mayor aumento, puede conllevar a cometer errores en los resultados de los análisis mineralógicos.



**Foto 91.-** (LR-N//s) Grano compuesto por dos minerales difícilmente perceptibles. Pentlandita? (ptd?)/bordes y pirrotita? (po?)/núcleo. Al lado superior izquierdo se tiene una ligera ampliación de la imagen con una disminución del brillo, donde se aprecia con mayor claridad la inclusión de pirrotita (po) en pentlandita (ptd?).



En el capítulo anterior se hizo mención de una especie mineral reportada por primera vez durante las investigaciones de campo realizadas en Tapo, cuya principal característica distintiva es su color lila (Fotos 92 y 93) asociado principalmente a las serpentinitas verde amarillentas, mostrando las siguientes características físicas:

- **Hábito:** tabular a masivo.
- **Color:** lila a morado claro.
- **Brillo:** céreo a graso (graso al tacto).
- **Raya:** color lila muy claro.
- **Dureza:** baja entre 1,5 y 2 (según la escala de dureza relativa de Mohs, siendo mayor que el talco pero similar al yeso).
- **Clivaje:** perfecto en una dirección, aunque es menos exfoliable que la serpentina (*R. Castroviejo*, comunicación personal, 16 de abril del 2007).
- **Reacción al ácido:** débil efervescencia al ácido clorhídrico (HCl) en frío, haciéndose más evidente cuando el mineral se encuentra previamente pulverizado o también en ácido en caliente.

En los trabajos iniciales efectuados por *Hernández* (1991), este mineral fue considerado como una variedad más de serpentinita, siendo mencionada en sus informes internos como “Serpentina Gris Morada”.



**Foto 92.-** Vista macroscópica de algunos fragmentos de stichtita, mostrando su color y clivaje característico.



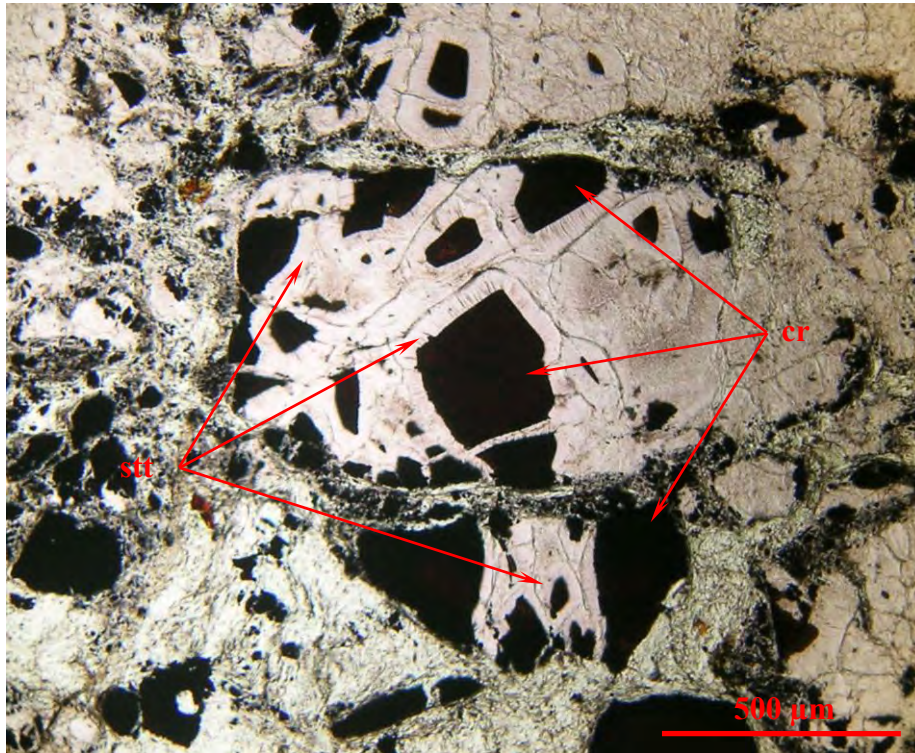
**Foto 93.-** Vista ampliada de otro fragmento de stichtita, mostrando su brillo céreo a graso.

Posteriormente y como parte activa del equipo de investigación, el autor de esta tesis realizó los estudios mineralógicos y microscópicos correspondientes a diversas muestras seleccionadas de esta especie, en el laboratorio de mineralogía de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), dándose a conocer por primera vez para la zona de Tapo, la presencia del mineral “**stichtita**”, dichos resultados fueron confirmados con mucho mayor detalle por los estudios efectuados por el **Dr. Ricardo Castroviejo** en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), utilizando entre otros métodos el análisis por Difracción de Rayos X (Ver subcapítulo 5.7). La **stichtita** corresponde a un carbonato hidratado de cromo y magnesio cuya fórmula química es  $(\text{Mg}_6\text{Cr}_2[(\text{OH})_{16}|\text{CO}_3]\cdot 4\text{H}_2\text{O})$ , siendo producto de la alteración hidrotermal de la cromita en presencia del  $\text{CO}_2$ .

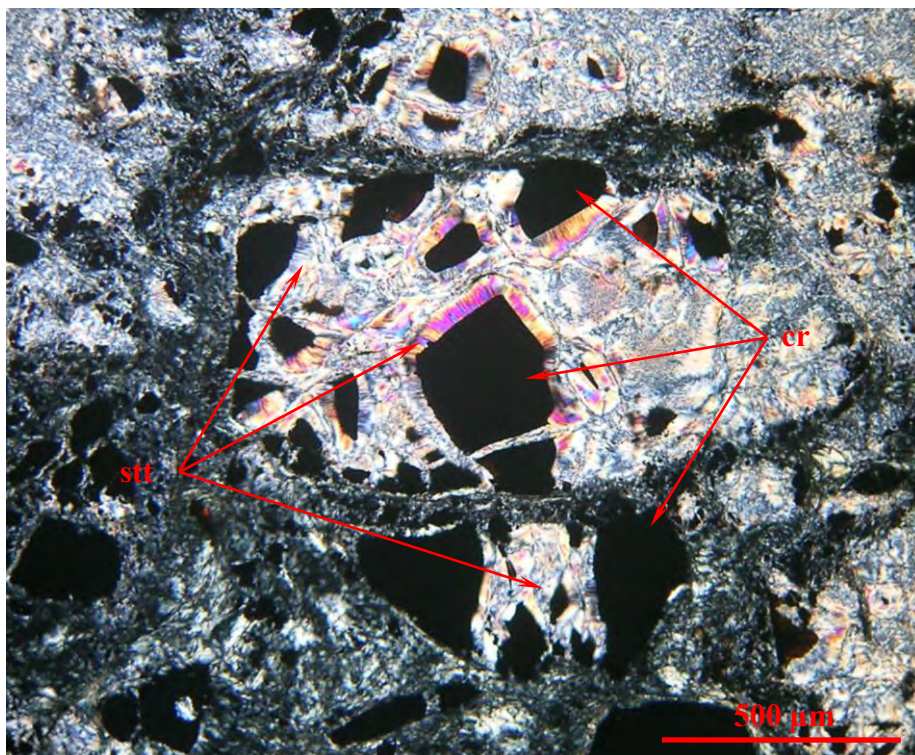
Entre sus principales características ópticas tenemos:

- **Color:** incoloro a ligeramente liliáceo.
- **Pleocroismo:** débil.
- **Relieve:** positivo.
- **Hábito:** agregados de aspecto fibroso.
- **Clivaje:** perfecto.
- **Anisotropía, Color de Interferencia y Birrefringencia:** es anisótropo, presenta color de interferencia azul-celeste de 2º orden, con una birrefringencia de 0,026 a 0,027.
- **Carácter y Signo Óptico:** Uniáxico (-).

Según las muestras estudiadas, la cromita aparece como pequeños fragmentos subangulosos a subredondeados, inmersos en una matriz totalmente serpentizada (posiblemente antigorita y lizardita). Dichos fragmentos de cromita a su vez se encuentran bastante fracturados, mostrándose como relictos de formas angulosas, rodeados por coronas de **stichtita** (Fotos 94, 95, 96 y 97), exponiéndose siempre desde los bordes de la cromita, aparentemente con un desarrollo quelifítico. La **stichtita** se muestra generalmente, con una apariencia fibrosa algo curvada en su forma y colores de interferencia que van hasta un máximo del azul-celeste de 2º orden (Fotos 98, 99, 100 y 101).



**Foto 94.-** (LT-N/s) Clastos angulares de cromita (cr) cuyos bordes se encuentran alterados a stichtita (stt) de tonalidad liliácea.



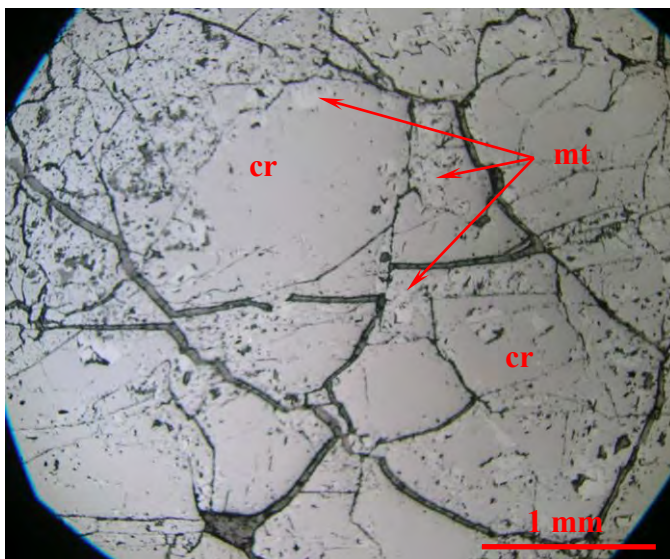
**Foto 95.-** (LT-NXs) La stichtita (stt) se muestra a manera de coronas de aspecto fibroso alrededor de la cromita (cr).

### 5.3 Identificación de las Asociaciones y Texturas

En esta parte se procederá fundamentalmente a describir las asociaciones (ensambles) y las relaciones texturales con el entorno del cual forma parte la cromita.

Como se mencionó anteriormente la cromita suele presentarse a manera de cuerpos elongados de dimensiones métricas y así también como finos granos milimétricos compactados.

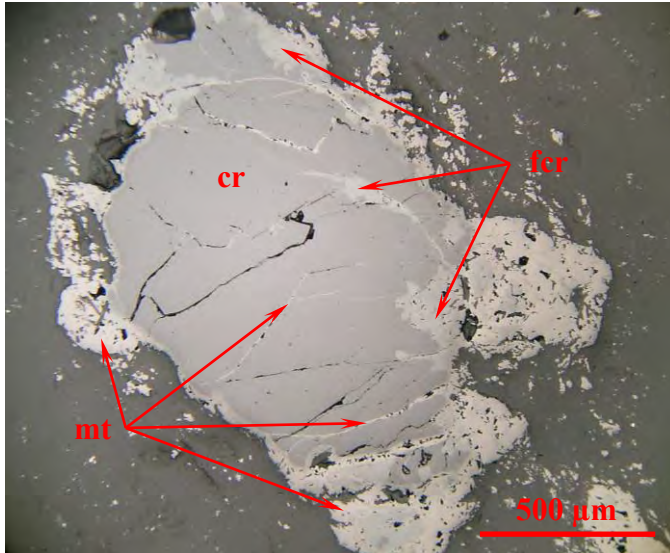
La cromita proveniente de los cuerpos elongados, presenta una textura masiva, xenomórfica y fuertemente fracturada (Foto 102). Los individuos de cromita se muestran casi sin alteración o con leve alteración a magnetita, tanto como finísimas inclusiones dispersas o también a manera de corona rodeando los bordes de los granos de cromita.



**Foto 102.-** (LR-N//s)  
Individuo xenomórfico de cromita (cr) masiva fuertemente fracturada, mostrando algunas inclusiones de magnetita (mt) anhedral.

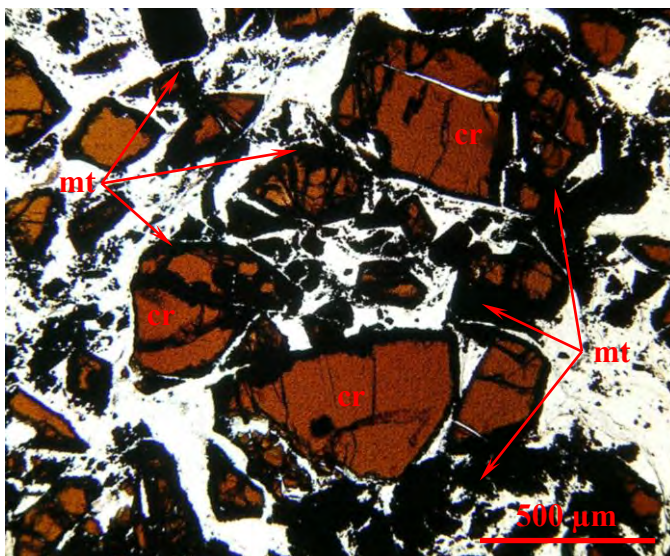
También puede presentarse como finas disseminaciones en las serpentinitas, especialmente en las serpentinitas verde amarillentas, mostrando una clara zonación concéntrica producto de la alteración de la cromita. Desde el centro del grano hacia los bordes tenemos a la cromita propiamente dicha, luego una transición mineralógica denominada ferritcromita y finalmente magnetita secundaria. Del mismo modo, es posible observarlo en los bordes de las fracturas del grano. *Ineson*

(1989), define a esta configuración como “**textura de reemplazamiento central y zonal**” (en inglés: “core and zonal replacement texture”), mostrada en la foto 103.



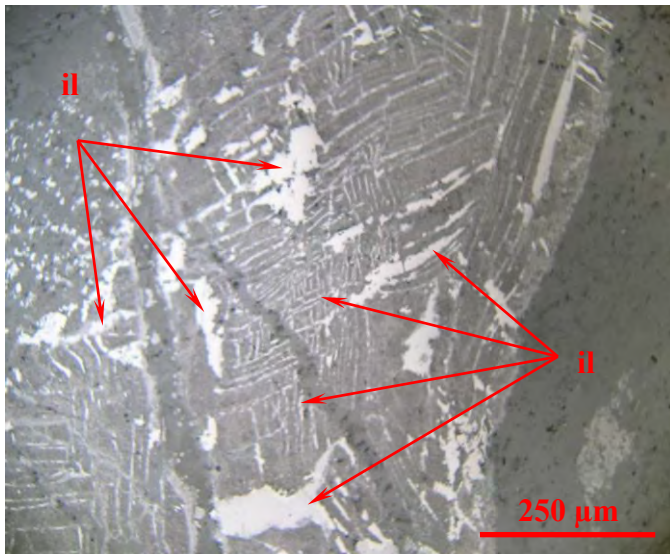
**Foto 103.-** (LR-N//s) Grano de cromita (cr) anhedral mostrando su zonamiento concéntrico, gradando desde el centro hacia los bordes a ferritcromita (frc) y magnetita (mt), incluso en las finas zonas de fractura.

Las cromititas, están compuestas mayoritariamente por individuos xenomórficos de cromitas, mostrando una textura de tipo cataclástica, exponiendo granos con formas netamente angulosas, diseminados en una matriz totalmente serpentinizada. La alteración es restringida solo a los bordes mostrando una corona compuesta de magnetita. En la foto 104, se puede observar a la cromita mostrando bordes oscuros de minerales opacos correspondientes a la magnetita secundaria.



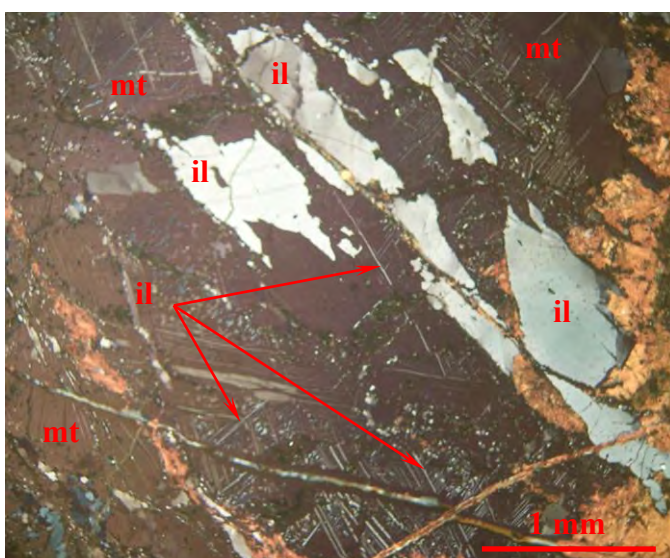
**Foto 104.-** (LT-N//s) Granos de cromita (cr) de formas anhedrales y angulosos, mostrando finos bordes opacos de magnetita (mt), incluso en las finas zonas de fractura.

Es bastante común encontrar ilmenita en gran parte de las serpentinitas especialmente en las serpentinitas gris verdosas, hallándose asociada principalmente a la magnetita. La ilmenita se presenta mostrando arreglos como finas exsoluciones lamelares, siguiendo mayormente un patrón triangular paralelo a las direcciones de partición octaédrica (111), mostrándose por lo general pseudomorfa de las espinelas (Foto 105).



**Foto 105.-** (LR-N//s)  
Lamelas de ilmenita (il),  
mostrando patrón  
triangular, propio de la  
partición octaédrica de las  
espinelas en gangas  
serpentinizadas, asociada  
posiblemente a titanita.

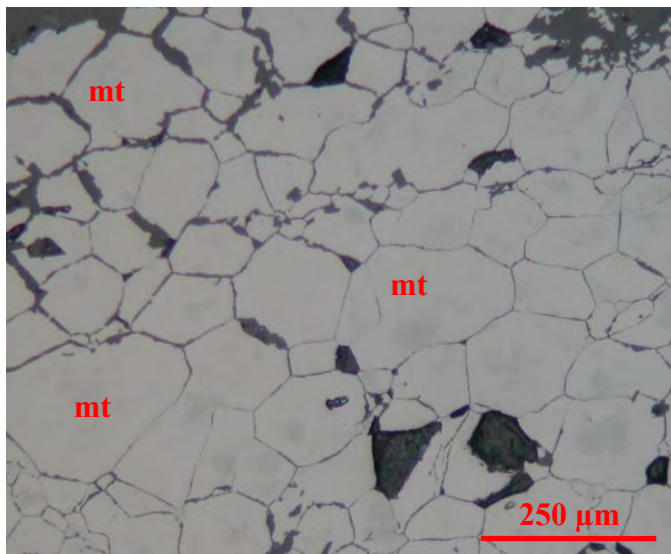
Se pueden encontrar a las lamelas de ilmenita inmersas; tanto en una matriz serpentinizada, así como también en exsoluciones incluidas en magnetita; aunque en este caso, la ilmenita suele presentarse además como playas anhedrales en magnetita (Foto 106).



**Foto 106.-** (LR-NXs)  
Playas y lamelas con  
formas alargadas de  
ilmenita (il). Las lamelas  
muestran el reticulado  
triangular, propio de la  
partición octaédrica de las  
espinelas.

Cabe la posibilidad de que la magnetita mencionada anteriormente y que se encuentra asociada a la ilmenita, pueda tratarse más bien, de una **titanomagnetita** de fórmula  $\text{Fe}^{2+}_{1-x}\text{Fe}^{3+}_{2-2x}\text{Ti}^{4+}_x\text{O}_4$ . Dicha afirmación podrá ser corroborada o descartada solo mediante los análisis realizados por instrumentos más sofisticados. Además se debe mencionar que debido a la aparición frecuente de la ilmenita, es posible considerar la presencia de titanita (esfena) secundaria, producto de la alteración de la ilmenita; en la mayoría de los casos asociada a los minerales serpentinizados.

También es importante mencionar, que en algunas serpentinitas gris verdosas se han observado la presencia de granos de magnetita, dispuestos a manera de mosaicos unidos entre sí de tres en tres (juntas o uniones triples), formando un ángulo interfacial aproximado de  $120^\circ$ . *Ineson*, (1989) lo denomina texturas de recristalización (en inglés: “recrystallisation textures”). *Martínez*, (2002) sostiene que el origen de esta textura es debida a un incremento de la temperatura, pero sin sometimiento a esfuerzo alguno (“annealing”), dando como consecuencia un aumento en el tamaño de los granos sin contener dislocaciones debidas a deformación. En las fotos 107 y 108 (cortesía del *Dr. R. Castroviejo*), se puede observar las formas poligonales adoptadas por la magnetita recristalizada.



**Foto 107.-** (LR-N//s) En esta vista es posible apreciar de manera clara, al agregado de cristales poligonales de magnetita (mt) recristalizada.





Se han reconocido hasta dos fases de formación, una primera fase de tipo magmática de alta temperatura donde se han formado inicialmente la cromita, posteriormente tenemos a la magnetita, aunque entre ésta y la cromita puede darse una fase intermedia conocida como ferritcromita, solo identificada en algunas muestras de serpentinitas gris verdosas. Antes de finalizar la formación de magnetita, tenemos a la ilmenita como última etapa de la fase magmática; ella puede presentarse principalmente como alteración de las espinelas (magnetita o cromita).

Conforme desciende la temperatura, se llega a una fase sulfurada, donde debido a sus finísimas dimensiones, ha sido muy difícil poder reconocer cristales tanto de pirita como de skutterudita, posteriormente se tienen sulfuros como pentlandita, pirrotita y calcopirita, mostrándose mayormente anhedral y con texturas intersticial y de tipo corona, asociada principalmente a las magnetitas y en menor proporción a las gangas serpentinizadas.

## **5.5 Identificación Microscópica de las Rocas Cajas**

*Winkler* (1978), establece que, para el metamorfismo de las rocas ultrabásicas se requiere de la participación de H<sub>2</sub>O y/o CO<sub>2</sub> en las mismas. El acceso de agua, componente que es frecuentemente accesible, transforma a las rocas ultramáficas en serpentinitas compuestas principalmente por antigorita y lizardita/crisotilo y cantidades menores de talco o cuarzo, o brucita y algo de magnetita. Por lo tanto la serpentización de una ultramafita consiste básicamente en la hidratación de la asociación mineral primaria (olivino, ortopiroxeno y/o clinopiroxeno; en menor cantidad espinela cromífera, granate, plagioclasa cálcica, anfíbol y flogopita) con una escasa lixiviación de los componentes químicos originales. Hasta el día de hoy, se discute aún, si el proceso tiene lugar bajo condiciones de volumen constante, o también a composición constante, o más bien se realiza mediante una combinación de ambos (*Moody*, 1976; citado por *Melgarejo*, 2003). De cualquier forma, solo se requiere una introducción de agua en el sistema para originar la alteración.

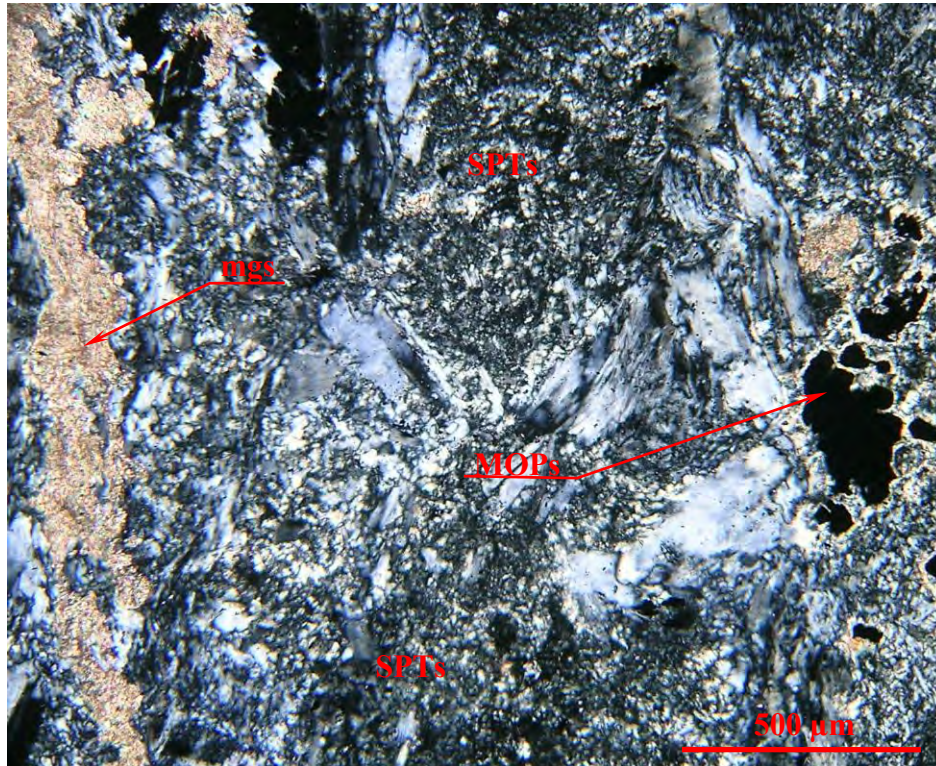
En el caso del Macizo de Tapo, las rocas encajonantes de los cuerpos de cromita, están compuestas esencialmente por serpentinitas, producto de la alteración

hidrotermal de las ultramafitas. La alteración es tan intensa que prácticamente no ha dejado rastros de las rocas ultramáficas iniciales compuestas muy probablemente por harzburgitas y en menor proporción de dunitas. Solo en lámina delgada ha sido posible poder observar la presencia de relictos o fantasmas de los minerales primarios componentes de dichas rocas. También es notable la intensa deformación penetrativa presente en toda la extensión de los cuerpos ultramáficos.

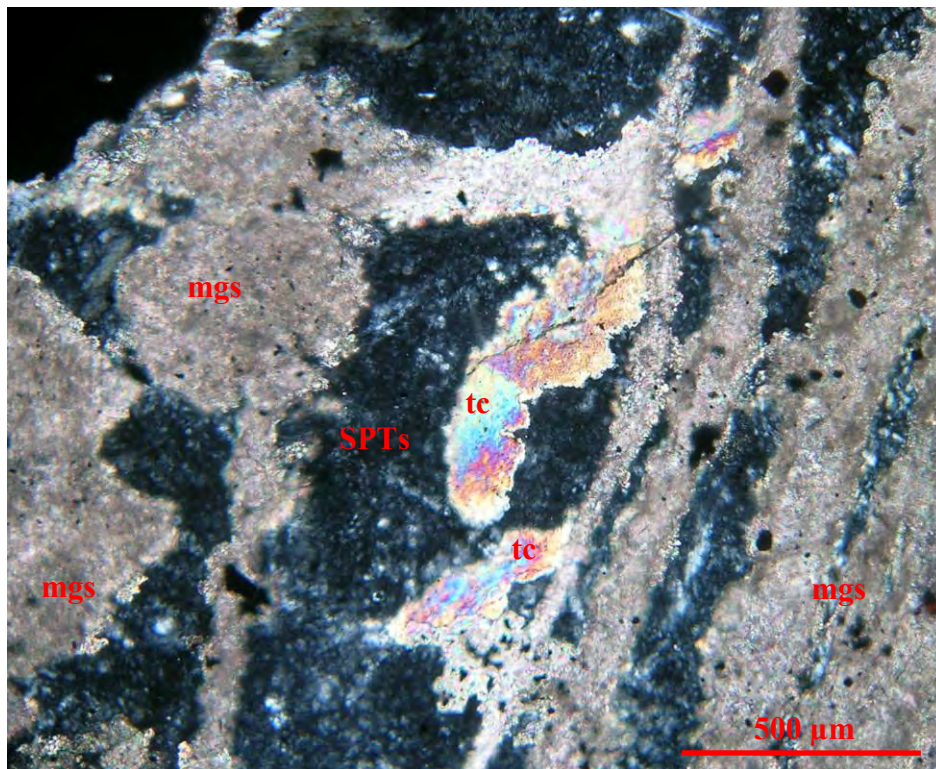
En capítulos anteriores se tomó en cuenta la clasificación generalizada sugerida por *Hernández* (1991), en la tipificación de las serpentinitas y así lograr describir sus características macroscópicas externas, denominándolas como serpentinita verde grisácea, serpentinita verde amarillenta y serpentinita verde botella. Al ser estudiadas mediante el microscopio de polarización, no presentaron mayor diferencia mineralógica, siendo posible encontrar dichas diferencias en el grado de esfuerzos estructurales a los que fueron sometidos estos cuerpos.

▪ **Serpentinita Gris Verdosa**, presenta una textura esquistosa, en partes reticulada y en algunos sectores mostrando un aspecto granular, compuesto principalmente por serpentinas del tipo antigorita; se observan venillas de magnesita (carbonato de magnesio), cortando a la muestra en diferentes direcciones, ocasionalmente granates, moldes de piroxenos? totalmente reemplazados totalmente por antigorita conocidos como 'bastita' (Fotos 109, 110, 111 y 112).

También es posible observar individuos anhedrales de talco, disseminaciones irregulares de minerales opacos (pirita, magnetita y muy escasamente cromita) y muy ocasionalmente ligeras ocurrencias de calcita.

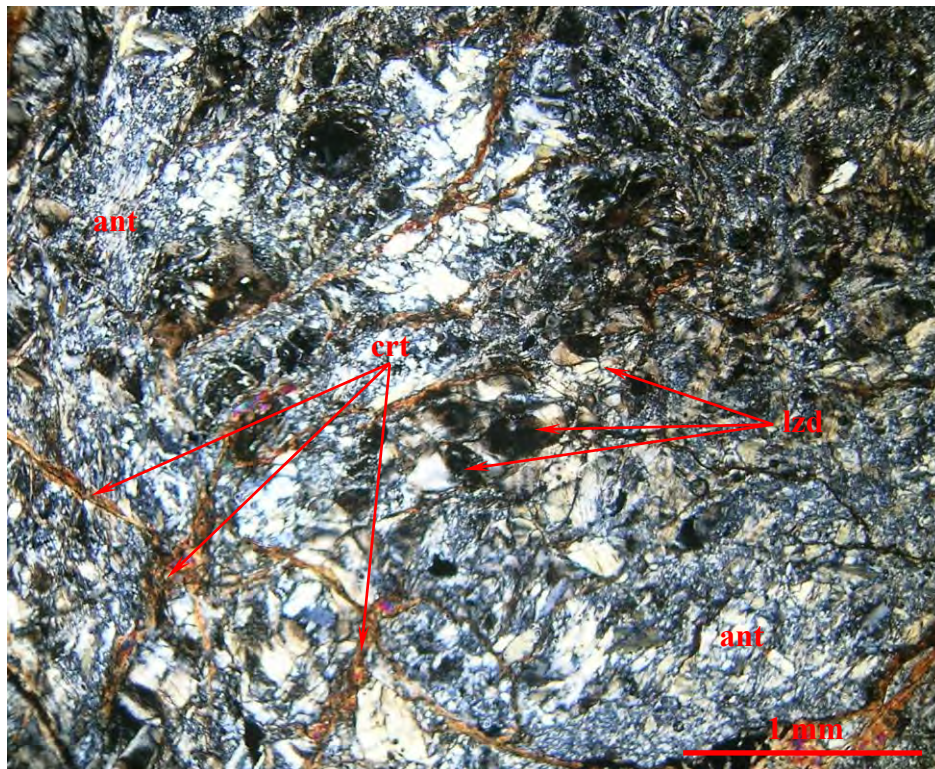


**Foto 109.-** (LT-NXs) Serpentin (SPTs), cortadas por venilla de magnesita (mgs) y diseminaciones de minerales opacos (MOPs).

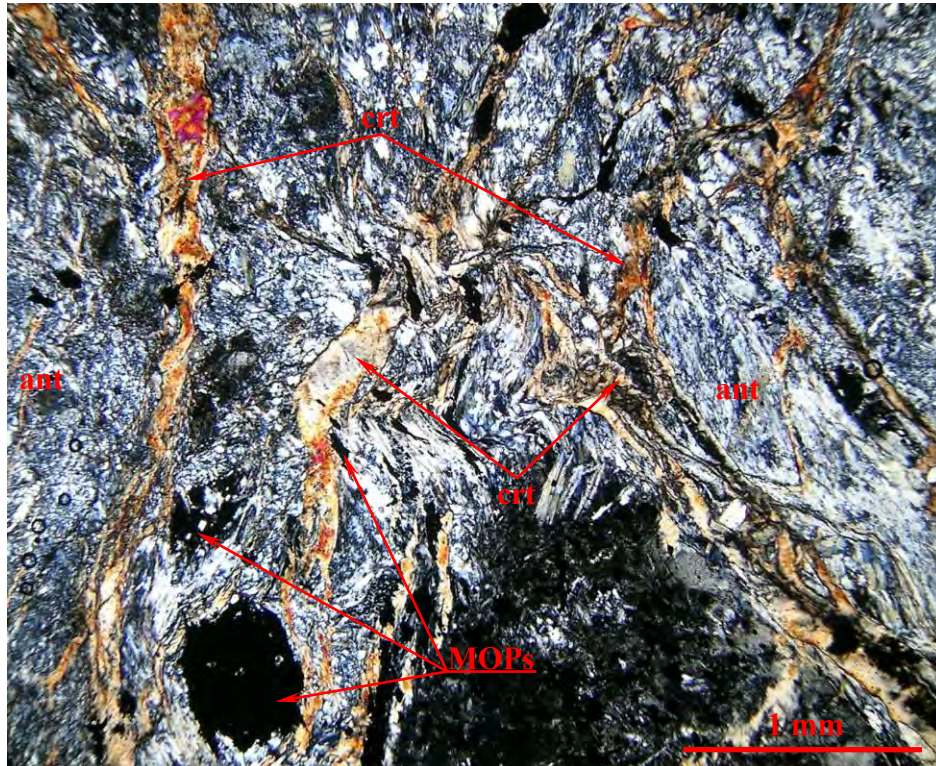


**Foto 110.-** (LT-NXs) Magnesita (mgs), tanto en venillas como en playas e individuos anhedrales de talco (tc) en serpentinas (SPTs).

- **Serpentinita Verde Amarillenta**, microscópicamente se presenta bastante deformada, producto de la intensa deformación penetrativa de tipo dúctil o frágil-dúctil. Puede mostrar una textura fuertemente esquistosa, granular y algo reticular, compuesta esencialmente por serpentinas de las variedades antigorita granular fina, crisotilo de hábito fibroso y muy probablemente lizardita de hábito tabular (se encontraron individuos muy finos de lizardita, muy difíciles de fotografiar, pero mostrando su típica textura “reloj de arena”, fotos 113 y 114). Se ha determinado hasta dos eventos de carbonatación. El primero con un desarrollo de finas venillas de magnesita exhibiendo un aspecto granular a cristalino (formas romboédricas), siendo cortada a su vez por un segundo evento formado por venillas algo más gruesas de magnesita de aspecto masivo (Foto 116). Finalmente se tienen finísimas diseminaciones de minerales opacos de formas granulares y en venillas (pirita, cromita, espinelas), además de escasas ocurrencias de calcita.



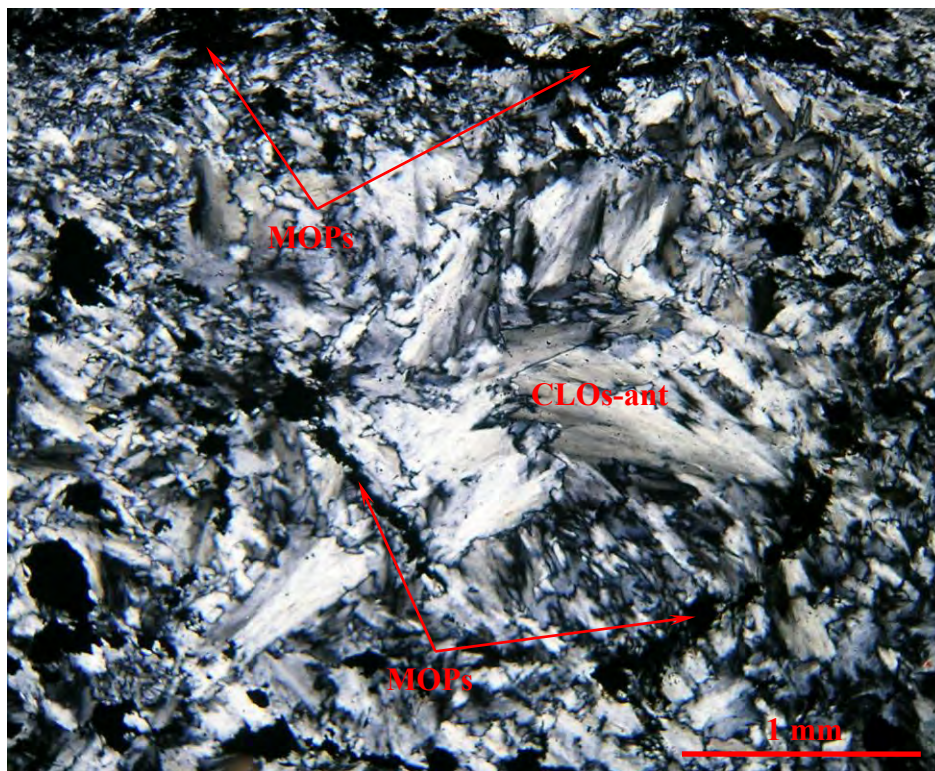
**Foto 113.-** (LT-NXs) Distribución de serpentinas. Antigorita (ant) granular, crisotilo (crt) venillas, lizardita (lzd) tabular.



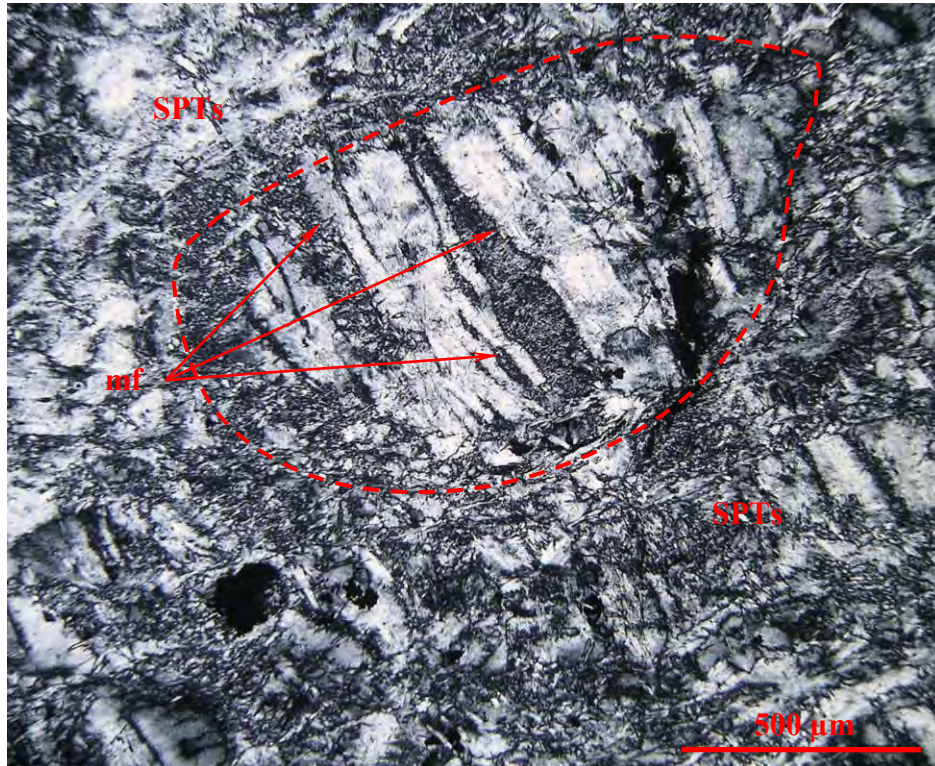
**Foto 114.-** (LT-NXs) La antigorita (ant) granular mostrando deformación dúctil, generando micropliegues. Venas fibrosas de crisotilo (crt).

La fuerte deformación penetrativa en la serpentinita verde amarillenta, se manifiesta con la presencia de micropliegues, microfracturas y microfallas, llegando a mostrar un aspecto de su esquistosidad casi milonítica (Foto 115).

- **Serpentinita Verde Botella**, microscópicamente presenta una textura igualmente esquistosa, aunque en un menor grado que las otras variedades de serpentinita; a la vez también se muestra reticulada y granular. Suele presentar moldes de olivino totalmente reemplazados por serpentininas muy probablemente de la variedad lizardita; incluso se pueden encontrar algunos moldes con rellenos ya sea de cloritas y/o serpentininas (Foto 117), posiblemente producto de la alteración de los cristales de piroxenos? (bastitas, foto 118) o de algunos cristales primarios totalmente reemplazados de espinela; se sugiere esta posibilidad, debido a la presencia de minerales opacos de aspecto lamelar relíctico (Foto 120), los cuales concuerdan aparentemente con las direcciones de partición de tipo octaédrico (111)



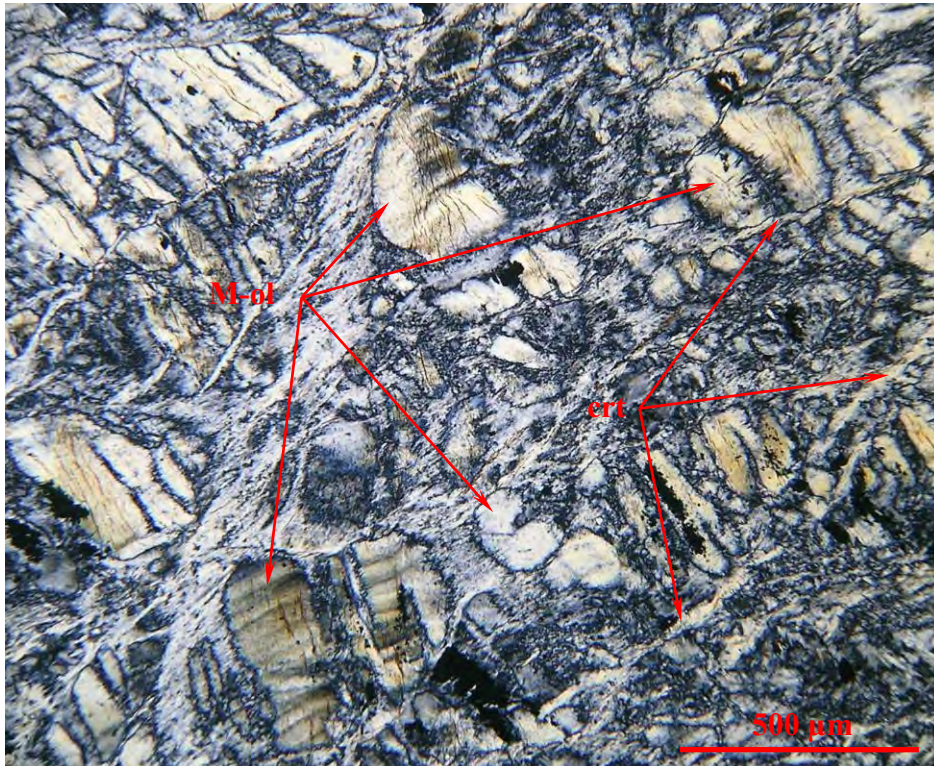
**Foto 117.-** (LT-NXs) Molde con relleno de cloritas-antigorita (CLOs-ant) de hábito hojoso, con bordes de minerales opacos (MOPs).



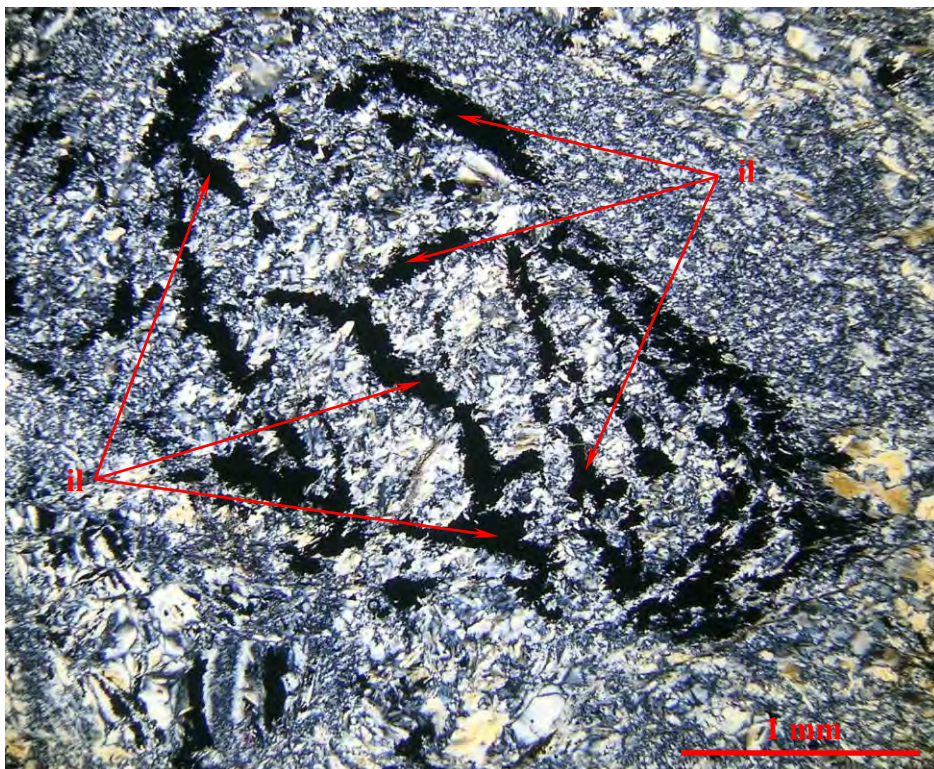
**Foto 118-** (LT-NXs) Molde de piroxeno? (bastita) totalmente pseudomorfizado a serpentinas (SPTs), Presenta microfisuras de tensión (mf).

presentes en algunas espinelas como la magnetita (ya definidos en el subcapítulo 5.2 correspondiente a la identificación microscópica de menas y gangas). Se observan finas venillas o rellenos submilimétricos de crisotilo mostrando su típico aspecto fibroso, cortando solo en algunas partes de la muestra (Foto 119). Es importante mencionar la presencia de microfracturas de tensión perpendiculares a la esquistosidad, siendo ésta otra característica que sugiere la presencia de un probable metasomatismo en las ultramafitas.



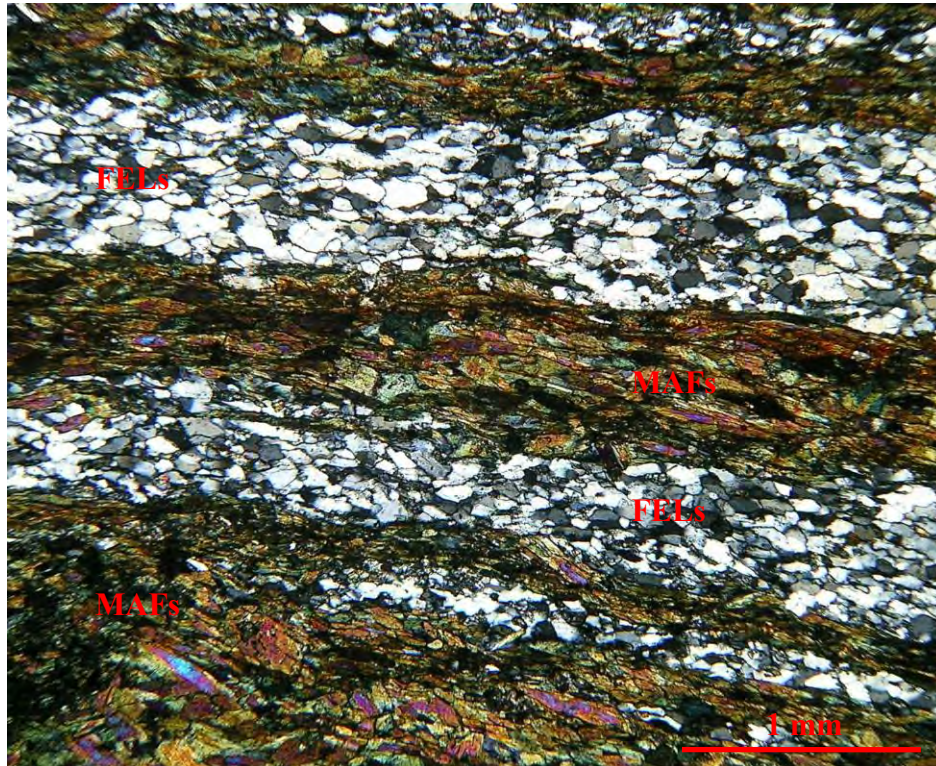


**Foto 119.-** (LT-NXs) Moldes (M) de olivino (ol), totalmente reemplazados por lizardita. Nótese la presencia de crisotilo (crt) de aspecto fibroso.

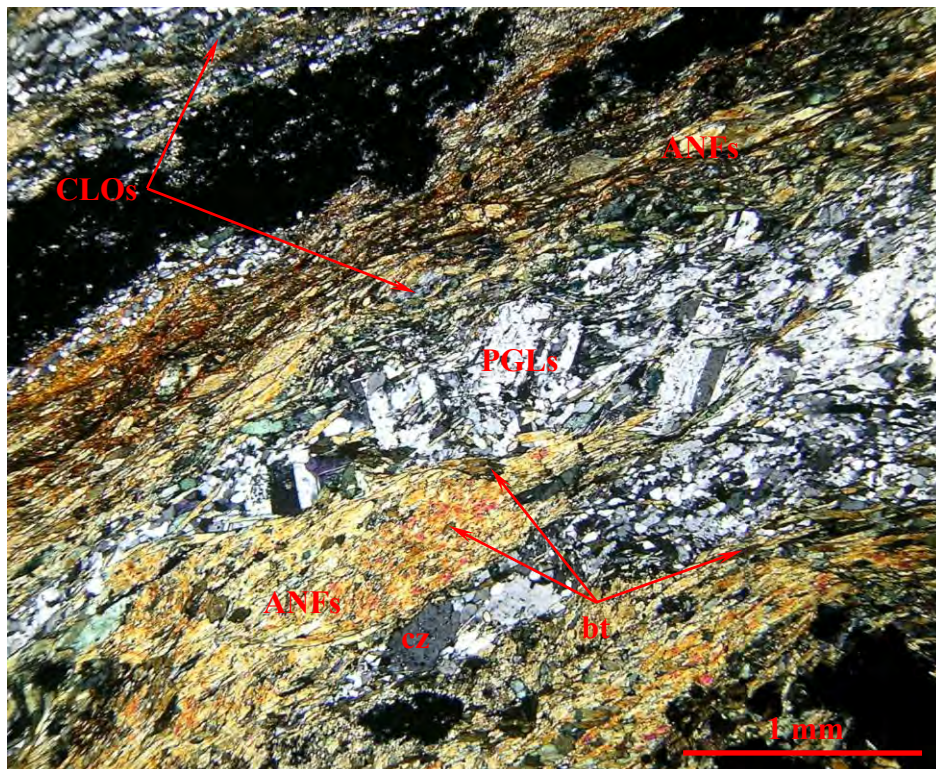


**Foto 120.-** (LT-NXs) Molde de posible espinela, mostrando la presencia de ilmenita (il) de aspecto lamelar relíctico entre las serpentinas.

**Anfibolitas**, vistas al microscopio, suelen presentar una intercalación de texturas granoblásticas (zona félsica) y nematoblásticas (zona máfica). Dicha alternancia rítmica de texturas forman lo que se conoce generalmente como “textura granonematoblástica”. La zona félsica está constituida por minerales prismáticos de plagioclasas y cuarzo; generalmente anhedrales y algo alargados siguiendo la dirección de la esquistosidad. La plagioclasa es de tipo cálcica (aproximadamente entre la andesina  $An_{[30-50]}$  y labradorita  $An_{[50-70]}$ ), puede presentar maclas de tipo albita y Carlsbad e incluso mostrar algunos individuos algo deformados debido a esfuerzos tectónicos (Fotos 121, 122, 123 y 124). El cuarzo presenta en algunos casos extinción ondulante y por lo general muestran contactos intergranulares triples. La zona máfica está compuesta por minerales como anfíboles (quien les da su denominación), cloritas, biotitas, granates, incluso piroxenos? y escasas ocurrencias de titanita (esfena). Los anfíboles poseen formas prismáticas alargadas o transversales rómbicas, incoloros a verde claro, relieve moderado y ángulos de clivaje con dos direcciones ( $56^\circ$  y  $124^\circ$ ). Las cloritas férricas de hábito micáceo y color de interferencia azul oscuro, se muestran tanto como finas diseminaciones entre los máficos o como finas venillas paralelas a la dirección de esquistosidad, siendo producto de alteración de los minerales máficos presentes. La biotita se muestra con hábito hojoso muy fino, alterándose fuertemente a cloritas. De manera, ocasional se observan algunos granos subhedrales de granates. Acumulaciones de piroxenos? de aspecto relicto, incoloro y de relieve alto; posiblemente de la variedad diópsido. Se han observado esporádicas ocurrencias de titanita (esfena) con formas anhedrales, posiblemente relacionadas a los minerales opacos presentes (posible ilmenita). *Winkler* (1978), sostiene que la presencia de cloritas en la paragénesis de la anfibolita, es diagnóstico de su bajo grado de metamorfismo.

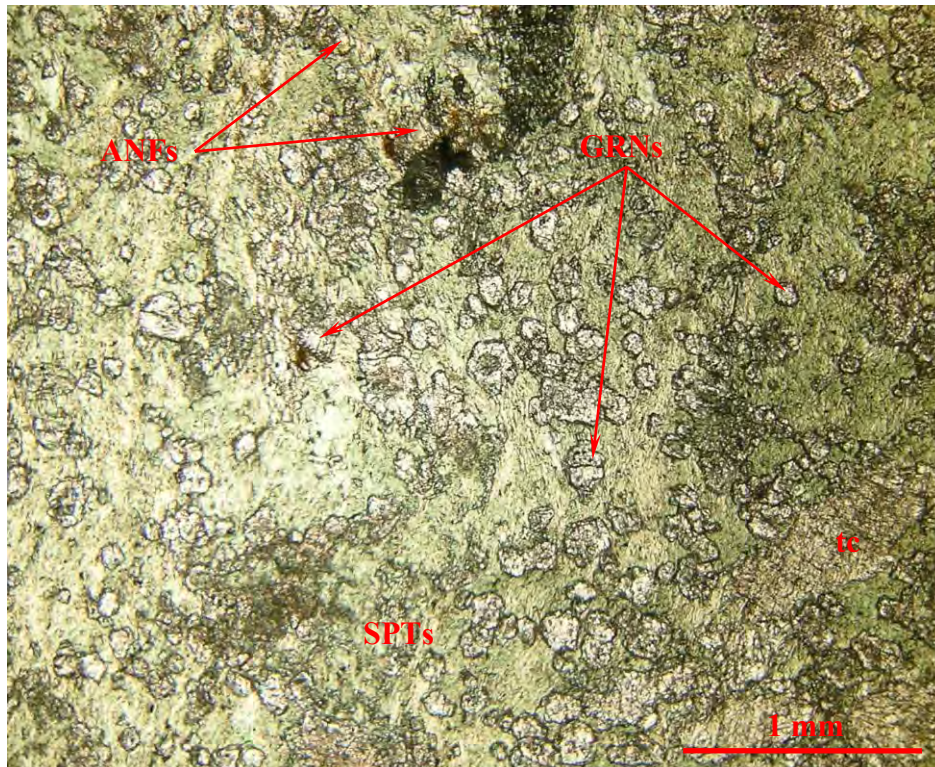


**Foto 121.-** (LT-NXs) Textura grano-nematoblástica, de niveles alternos de minerales félsicos (FELs) y máficos (MAFs).

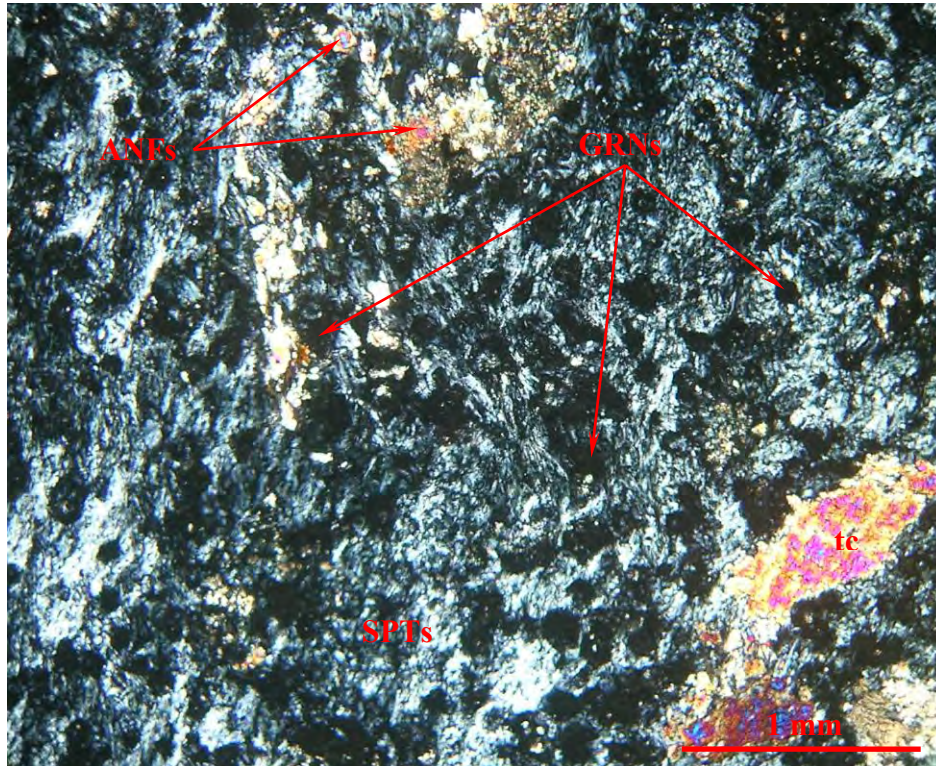


**Foto 122.-** (LT-NXs) Distribución de cristales, anfíboles (ANFs), biotita (bt), cloritas (CLOs), plagioclasas (PGLs) y cuarzo (cz).

- **Serpentinitas granatíferas**, macroscópicamente clasificada como una serpentinita gris verdosa; pero a diferencia de ésta, se presenta con un contenido de granates menor a los 20 %, embebidos en una matriz compuesta por serpentinas de la variedad antigorita de tipo granular, no se observan rastros de esquistosidad. También puede contener talco, relictos de anfíboles muy finos y escasas ocurrencias de titanita (esfena) intersticial (Fotos 125 y 126).



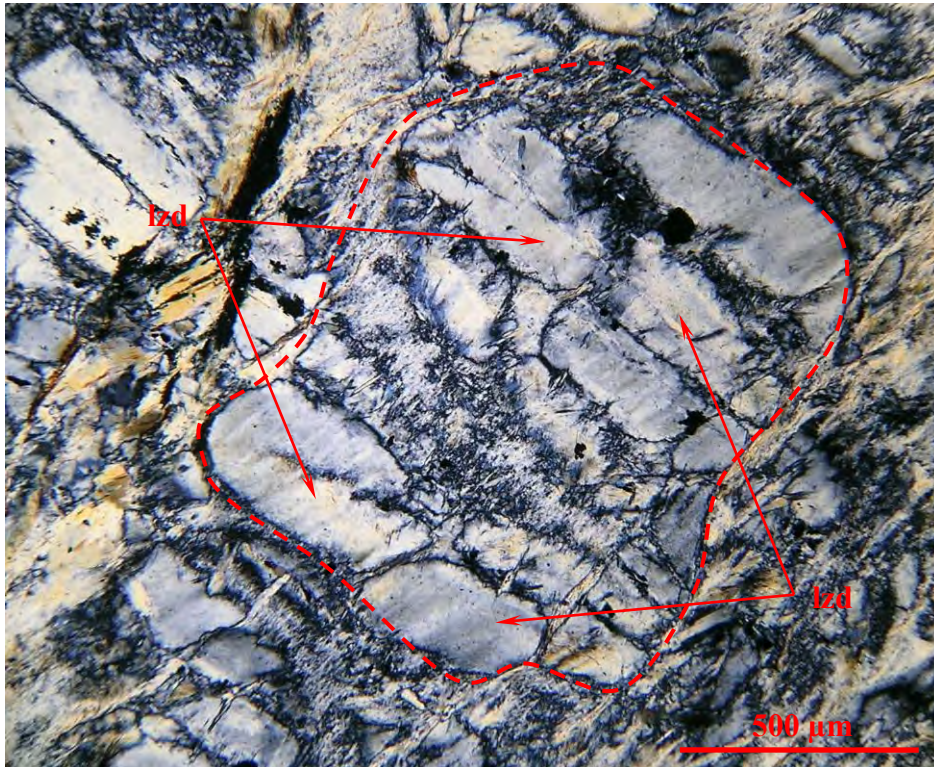
**Foto 125.-** (LT-N//s) Vista de la roca serpentinizada (SPTs), mostrando los granates (GRNs) diseminados y con alto relieve.



**Foto 126.-** (LT-NXs) Se observan cristales relícticos de anfíboles (ANFs) y escasos individuos anhedrales de talco (tc).

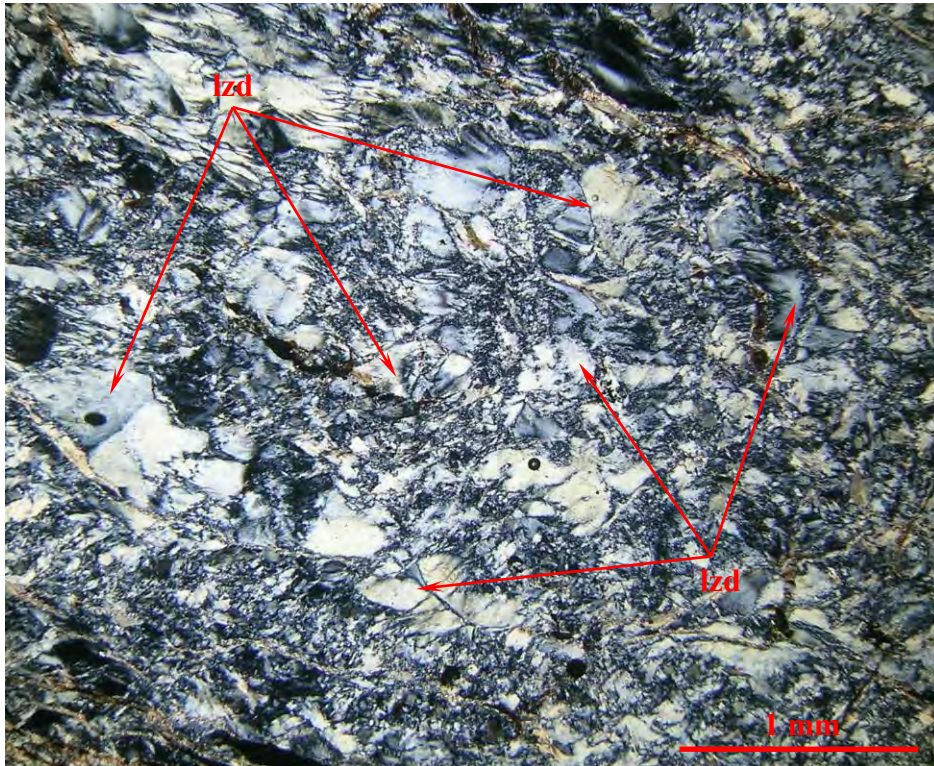
- **Cataclastitas de Cromita**, su composición mineralógica es bastante simple, mostrando una textura cataclástica, con ausencia de esquistosidad, compuestas íntegramente por granos fragmentales angulares a subangulares de cromita, inmersos en una matriz serpentínica compuesta esencialmente de antigorita y en menor proporción por lizardita, exponiendo ambos su hábito fibroso (Fotos 127 y 128). Los fragmentos de cromita suelen presentarse rodeados por una corona de minerales opacos, posiblemente de magnetita. En las muestras estudiadas, no se ha observado la presencia de stichtita asociada a la cromita.

- **Dunitas**, le asignamos esta posible denominación, debido a que en el estudio microscópico se observa una roca totalmente serpentizada, mostrando una textura fanerítica donde destacan moldes fantasmas de olivino totalmente reemplazados a serpentinas, muy posiblemente de la variedad lizardita. Se postula su origen como producto de la alteración por hidratación de los olivinos de la roca dunítica original (Fotos 129 y 130). La matriz se encuentra formada por relictos de cristales de talco,

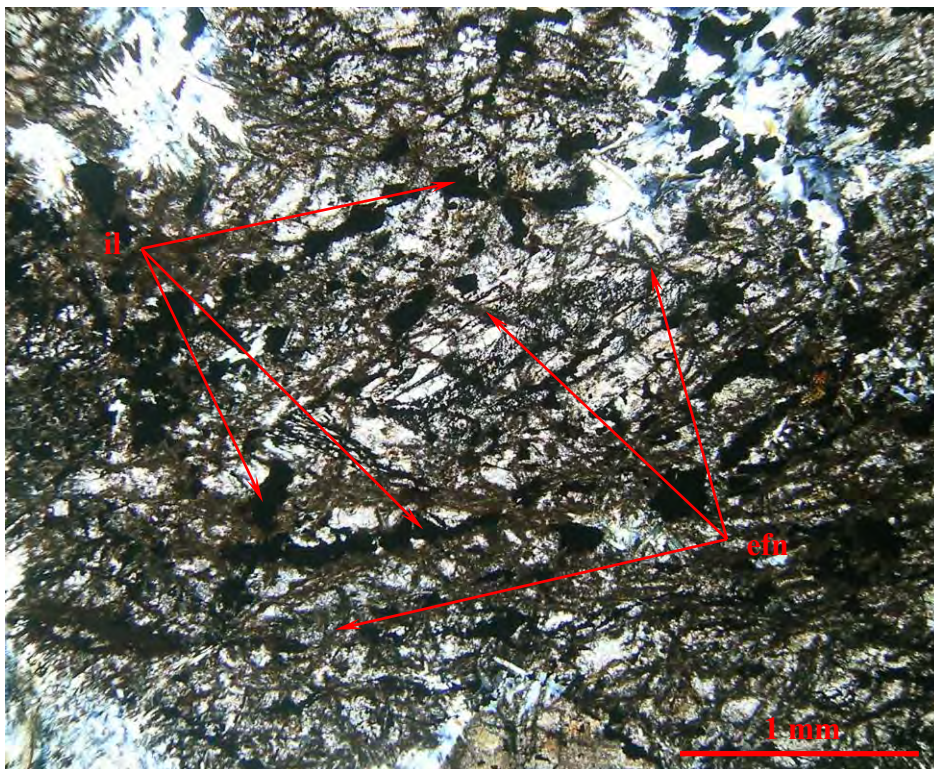


**Foto 129.-** (LT-NXs) Detalle de un molde, probablemente de olivino, con relleno de serpentinas, predominando mayormente la lizardita (lzd).

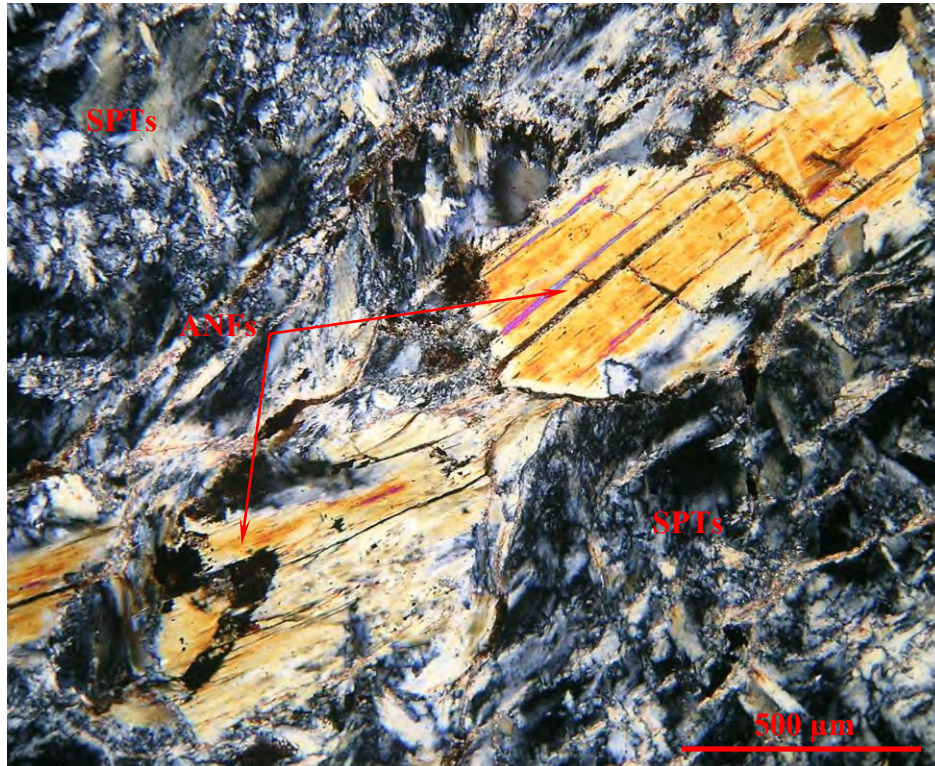
anfíboles y cloritas, los cuales al igual que el resto de la roca, se encuentran en proceso de serpentización. También es posible observar algunas inclusiones de minerales opacos como ilmenita, asociada a titanita (esfena), dispuesta a manera de finas lamelas paralelas a las direcciones de partición octaédrica (111) de alguna espinela primaria (cromita, magnetita. Fotos 131 y 132).



**Foto 130.-** (LT-NXs) Detalle de la textura fuertemente serpentinizada. Moldes de olivino totalmente reemplazados por lizardita (lzd).



**Foto 131.-** (LT-N/s) Disposición espacial de lamelas de ilmenita (il) y titanita o esfena (efn) siguiendo las direcciones de partición (111).



**Foto 132.-** (LT-NXs) Anfíboles (ANFs) en cristales relícticos, cuyos bordes se muestran corroídos por las serpentinas (SPTs).

## 5.6 Identificación de las Asociaciones de Alteración

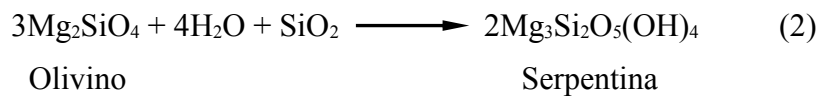
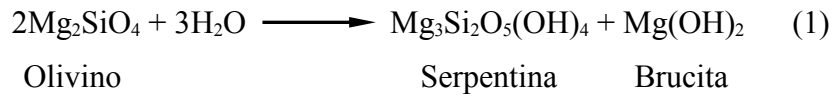
Se conoce que la ocurrencias de serpentinitas en la localidad de Tapo, deben su origen al emplazamiento de rocas ultramáficas (Pre-Cámbrico), compuestas principalmente por peridotitas (de naturaleza harzburgítica) y en menor proporción por dunitas. Según *Winkler* (1978), el olivino, los ortopiroxenos y/o clinopiroxenos; son los minerales más importantes en las ultramafitas, en menor cantidad puede tener espinela cromífera, granate, plagioclasa, anfíbol, flogopita y al nivel de trazas sulfuros de Fe-Ni-Cu de tipo pirrotita, pentlandita y calcopirita. Para poder ocurrir un proceso de metamorfismo en estas rocas, es necesaria la presencia de H<sub>2</sub>O y/o CO<sub>2</sub>. El agua transforma a las rocas ultramáficas en serpentinitas. Estas nuevas rocas se presentan formadas por antigorita, lizardita y crisotilo, además de cantidades menores de talco, brucita, magnetita secundaria y algo de carbonatos.

La mineralogía de las ultramafitas, es un factor importante en el proceso de serpentinitización, observándose que son los olivinos los que se alteran mucho más

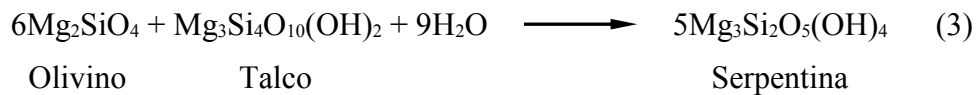


rápidamente que los piroxenos y entre ellos, los ortopiroxenos los que se serpentinizan con mayor facilidad. Debido a esto se puede afirmar que una ultramafita tenderá a serpentinizarse tanto más, cuanto mayor sea su contenido en olivino, implicando con esto que las dunitas logran alterarse con mayor facilidad que las harzburgitas y éstas más que las lherzolititas (Moody, 1976; Wicks & Whittaker, 1977; citados por Melgarejo, 2003).

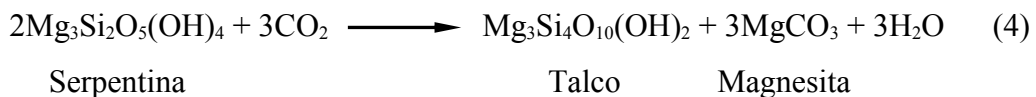
Deer et al., (1992), establece las siguientes reacciones de formación de serpentinas por hidratación del olivino (forsterita):



También puede obtenerse serpentina, mediante la hidratación conjunta del olivino y el talco:



De la reacción de la serpentina con el CO<sub>2</sub>, puede formarse talco y magnesita, según la siguiente ecuación:



Además de las relaciones anteriores, Best (1982), sugiere la siguiente relación para la transformación a serpentina:



<b>Código</b>	<b>Tipo de Muestra</b>
080806-02	Serpentina gris verdosa
090806-06	Serpentinita verde botella
090806-07	Stichtita
090806-08	Serpentina verde amarillenta
100806-16	Cromita

Los resultados obtenidos mediante el análisis espectrográfico multielemental, señalado en *Carrascal et al.*, (2007) indican la presencia de los siguientes elementos (Tabla 5.1):

**Elementos Mayores:** Mg, Fe, Si y Cr.

**Elementos Menores:** Si, Al y Cr.

**Elementos Trazas:** Ni, Ti, Cu, Mn, Cu, Co, V y Cr.

**Vestigios:** Ag.

De igual modo, se realizó el análisis químico cuantitativo a dichas muestras por los elementos Cr, Ni y Co, cuyos resultados dieron los rangos de valores siguientes (Tabla 5.2):

**Cromo:** 0,005 % a 19,190 %

**Níquel:** 0,089 % a 0,320 %

**Cobalto:** 0,018 % a 0,048 %

Por otro lado, una muestra de serpentinita gris verdosa (080806-02) y otra de cromita (100806-16), fueron analizadas por difracción de rayos X y cuyos resultados dieron las siguientes fases minerales (Tabla 5.2):

**Antigorita:**  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$

**Cromita:**  $Fe^{2+}Cr_2O_4$

**Magnetita:**  $Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$

Asimismo se determinó la presencia de estas otras especies minerales:

**Cromato de magnesio y aluminio:**  $\text{MgAlCrO}_4$

**Ringwoodita:**  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$

**Magnesiocromita:**  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$

**Crompicotita:**  $(\text{Mg,Fe})\text{O}(\text{Cr,Al})_2\text{O}_3$

**Espinela de cobalto y magnesio:**  $\text{Co}_2\text{MnO}_4$

**Nicromita:**  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$

**Clinocloro:**  $(\text{Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

En las Figuras 5.1 y 5.2, se proporcionan los difractogramas de rayos X correspondientes a cada una de las muestras indicadas anteriormente.

Como se mencionó en el subcapítulo 5.2, algunas muestras de **stichtita** fueron enviadas a la Universidad Politécnica de Madrid, donde el **Dr. Ricardo Castroviejo** efectuó los análisis por difracción de rayos X, confirmando los estudios hechos en la UNI sobre la presencia de este mineral. Las tablas 5.3 y 5.4, mencionan a que fase mineral le corresponde y los picos intensos hallados en el difractograma, mientras que la figura 5.3 muestra el difractograma respectivo, donde predominan la **stichtita**, y junto con ella otra especie mineral conocida como “**nimita**”, cuya fórmula según *Fleischer* (1980) corresponde a:  $(\text{Ni,Mg,Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ . La **nimita** pertenece al grupo de las cloritas, siendo en este caso una clorita niquelífera, que suele presentarse asociada a las serpentinas.

**Tabla 5.1.-** Resultados del análisis espectrográfico multielemental.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINERA Y METALURGICA**

AV. TUPAC AMARU N° 210 RIMAC APARTADO 1301 TELF.: 481-1070 ANEXO 311 TELEFAX: 482-8533

Email: decano\_figmm@uni.edu.pe LIMA-PERU

**LABORATORIO DE ESPECTROMETRÍA**

**ANALISIS DE MUESTRAS DE SERPENTINAS**

**SOLICITADO : REPSA**

**RECEPCIÓN DE MUESTRAS : Lima, 26 de Octubre del 2006**

**1.- RESULTADO DEL ANÁLISIS ESPECTROGRAFICO MULTIELEMENTAL DE SERPENTINAS**

Muestra	E. Mayores	E. Menores	E. Trazas			Vestigios
080806-02	Mg Fe Si	-	Ni Al Ti Cr	Cu Mn Co	-	V Ag
090806-06	Mg Fe Si	Al	Ti Mn	Ni V Cu Co	Cr	Ag
090806-07	Mg Fe	Si Al Cr	Mn	Ni Co V Ti	Cu	Ag
090806-08	Mg Fe Si		Ni Al Cr Mn	Co	V Cu Ti	Ag
100806-16	Mg Fe Cr	Si Al	Ti Mn	Ni V Cu Co	- -	Ag

E. Mayores : Mayores que 10%  
 E. Menores : Entre 10 y 1 %  
 E. Trazas : Entre 1 y 0.001%  
 Vestigios : Menores que 0.001%

**Tabla 5.2.-** Resultados de los análisis por cromo, níquel y cobalto y de la difracción de rayos X.

**2.- RESULTADO DEL ANÁLISIS DE CROMO, NÍQUEL Y COBALTO**

Muestra	%Cr	%Ni	%Co
080806-02	0.179	0.1100	0.0240
090806-06	0.005	0.0950	0.0180
090806-07	9.670	0.0900	0.0360
090806-08	0.303	0.3200	0.0300
100806-16	19.190	0.0890	0.0480

**3.-RESULTADO DEL ANÁLISIS POR DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X**

Para este análisis las muestras de serpentinas son irradiadas con rayos X monocromáticos provenientes de un anticátodo de cobre, con filtro de níquel, obteniéndose los difractogramas de cada muestra, en el cual se identifican las fases componentes, cuyos resultados se indica en la tabla siguiente.

Muestra de Serpentina 080806-02

Mineral	Formula química
Antigorita	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
Cromita	$FeCr_2O_4$
Magnetita	$Fe_3O_4$

Muestra de Serpentina 100806-16

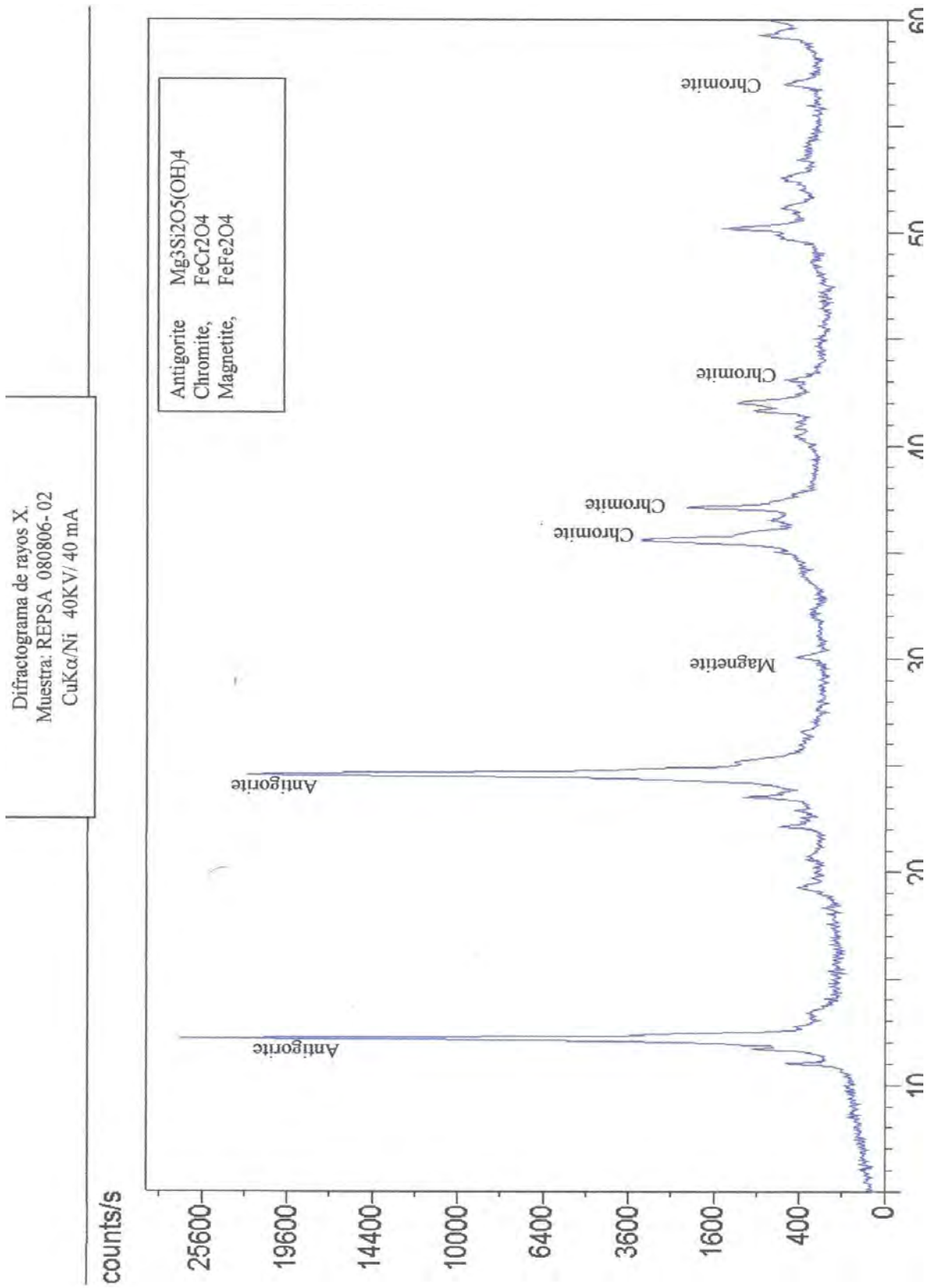
Mineral	Formula química
Cromato de magnesio y aluminio	$MgAlCrO_4$
Ringwoodita	$Mg_2SiO_4$
Magnesiocromita	$(Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$
Crompilotita	$(Mg,Fe)O(Cr,Al)_2O_3$
Espinela de cobalto y manganeso	$Co_2MnO_4$
Nicromita	$NiCr_2O_4$
Clinocloro-1M1b	$(Mg,Al)_8(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$

Lima, 20 de Diciembre del 2006

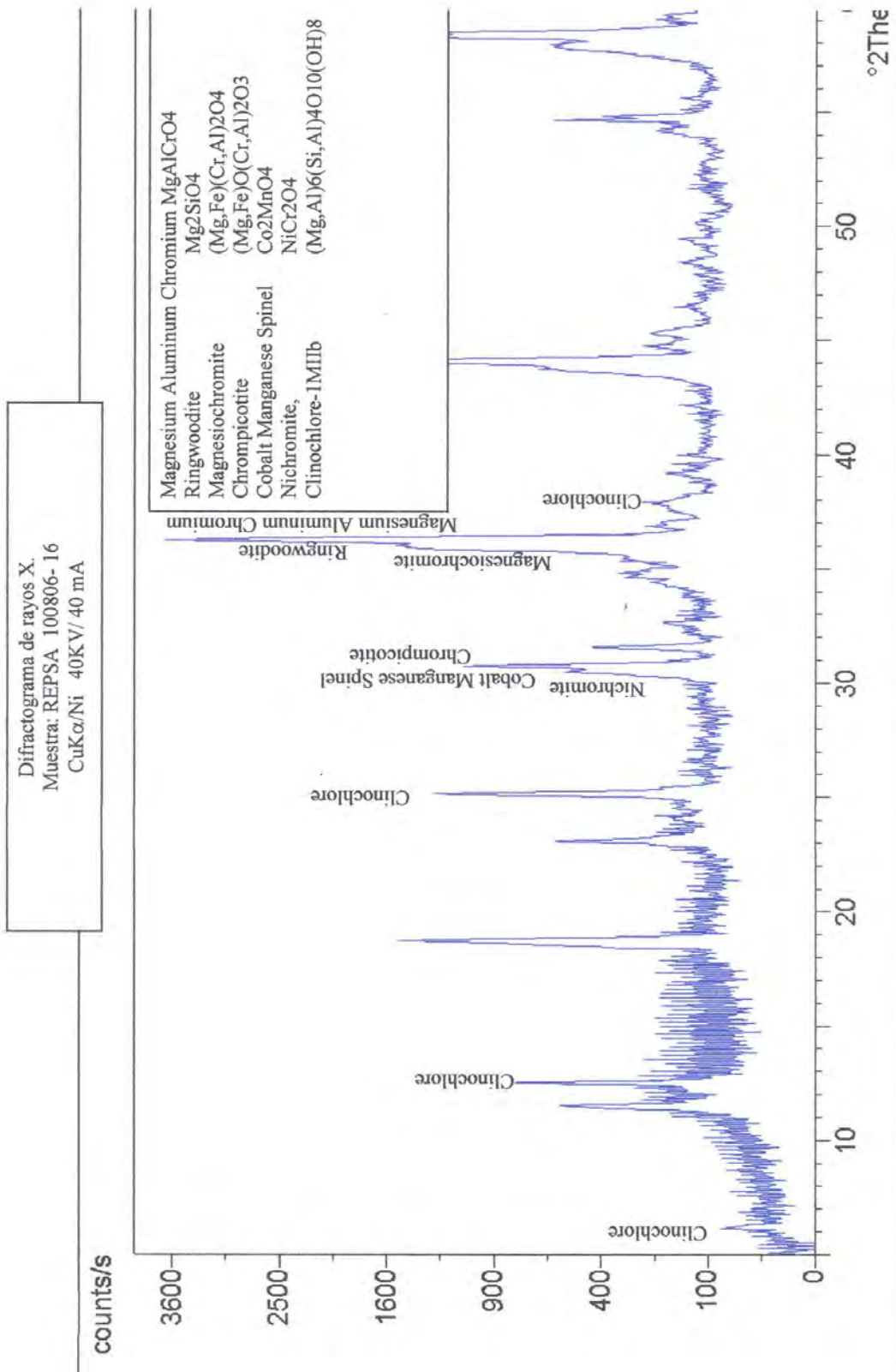
MSc. Atilio Mendoza A.  
 Jefe Lab. ESPECTROMETRÍA



Se adjunta difractogramas de rayos X de muestras de serpentinas 080806-02 y 100806-16



**Figura 5.1.-** Difractograma de serpentinita gris verdosa.



**Figura 5.2.** - Difractograma de una muestra de cromita.



**Tabla 5.3.-** Resultados del análisis por difracción de rayos X a la stichtita.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE  
INGENIEROS DE MINAS

Ríos Rosas, 21  
28003-MADRID  
Tfn: 91 336 70 65  
Fax (34.1) 336.70.68  
e-mail:  
centralizado@minas.upm.es

□

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS

LABORATORIO CENTRALIZADO

ANÁLISIS POR DIFRACTOMETRÍA

REFERENCIA MUESTRA:	MINERAL MORADO 090606-6.2 (Srp malva)
---------------------	------------------------------------------

Especies químicas y mineralógicas encontradas:

Con picos intensos:

- 1° Stichtite
- 2° Nimita
- 3°
- 4°
- 5°

Con picos débiles:

- 1°
- 2°
- 3°
- 4°
- 5°

---

**OBSERVACIONES:**

---

Madrid, 19 de Diciembre de 2006  
Fdo. : Laboratorio Centralizado

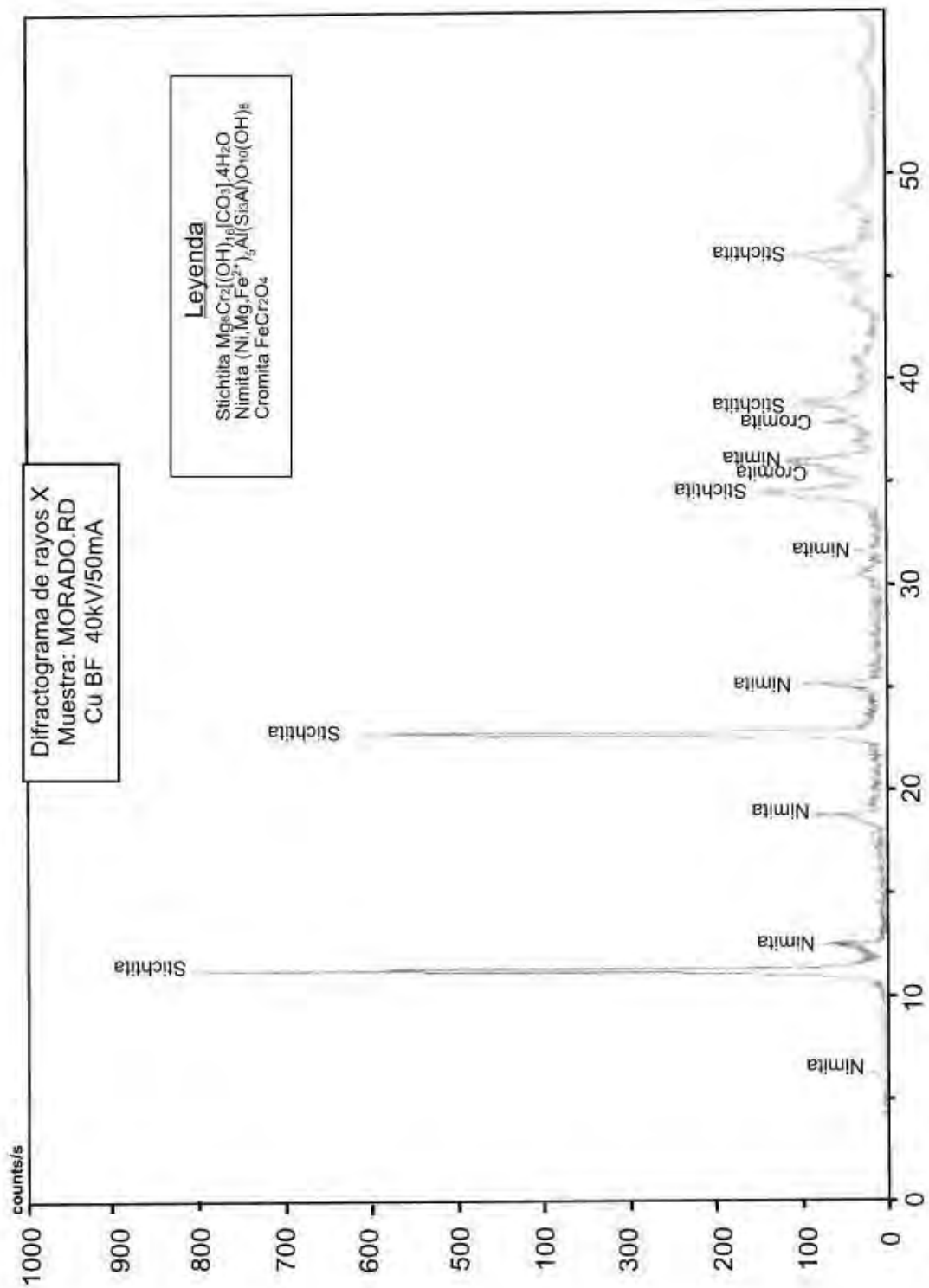
**Tabla 5.4.-** Valores de los picos hallados en la muestra de stichtita.

```

peak list                                     sample: MORADO                               12-nov-:5  2:
-----
PHILIPS Analytical                           PC-APD, Diffraction Software

      data file name: MORADO.RD   12-nov-:5  2:28
      diffractometer: PW1710
      x-ray tube: Cu BE 40kV 50mA
      wavelength(al,a2): 1.54060 1.54438
      monochromator: YES
      divergence slit: AUT
      irradiated length: 12 mm
      receiving slit: 0.1
      range 2theta: 4.000 - 60.000
      step width, time: 0.020 0.50
      peaks file name: MORADO.DI   12-nov-:5  2:28
      range d-value: 1.5406 - 22.0720
      range tip width: 0.00 - 2.00
      minimum significance: 1.75
      conversion to: FIXED
-----
peak  h-value  angle  width  peak  backg  I/Imax  significance
no    (Ang)    (deg)  (deg)  (cts)  (cts)  (%)
1     3.2555    6.195  0.160  34     1     4.72    1.84
2     7.8588    11.250 0.120  713    3    100.00  11.25
3     7.0926    12.470 0.120  64     3     8.98    3.24
4     4.7276    18.755 0.080  42     6     5.93    2.00
5     3.9192    22.670 0.120  310    10    43.45   8.35
6     3.5478    25.080 0.100  44     10    6.11    2.02
7     2.9314    30.470 0.480  10     8     1.35    3.31
8     2.8356    31.525 0.180  11     9     1.53    3.01
9     2.6046    34.405 0.280  45     11    6.30    4.65
10    2.5008    35.880 0.280  34     12    4.72    2.63
11    2.3763    37.830 0.240  13     13    1.82    2.04
12    2.3219    38.750 0.320  25     14    3.51    3.25
13    2.2003    40.985 0.480  6     13    0.88    1.86
14    2.0708    43.675 0.640  5     14    0.74    2.20
15    1.9737    45.945 0.160  22     17    3.10    2.38
16    1.8666    48.745 0.560  7     17    0.95    3.41
17    1.7614    51.865 0.480  3     12    0.45    1.91
18    1.6689    54.975 0.960  3     12    0.36    4.76
19    1.5368    57.685 0.480  6     11    0.68    2.02
-----

```



**Figura 5.3.-** Difractograma de la muestra de stichtita.

## 6. INTERPRETACIÓN DISCUSIÓN Y ESBOZO PRELIMINAR DEL TIPO DE YACIMIENTO

A continuación se resume los principales resultados obtenidos y su discusión en la interpretación del origen de las ocurrencias de cromita de Tapo.

- Desde el punto de vista litológico-estructural, los contenidos de cromo se encuentran íntimamente ligados a los cuerpos de serpentinitas que provienen de la alteración hidrotermal de rocas ultrabásicas de composición peridotítica y dunítica. Las evidencias encontradas en la zona de Tapo, indican que dicho cuerpo serpentinizado presenta una deformación interna dúctil, señalando una historia tectónica pre-andina, siendo relacionado a un ámbito profundo mantélico. Los contactos tectónicos aparecen plegados debido a la deformación andina; en consecuencia, se tiende a considerar a estas ocurrencias, de una naturaleza de tipo alóctona.
- Muy recientemente *Tassinari* (2011), logró datar los cuerpo ultramáficos de Tapo mediante el método Sm-Nd asignándole una edad aproximada de 720 millones de años (Pre-Cámbrico), además sugiere que los cuerpos de cromita y gabro son contemporáneos, derivándose de una misma fuente mantélica. También concluye mediante las determinaciones radiométricas de K-Ar, que el complejo ultramáfico de Tapo fue afectado por un episodio metamórfico, hace 450 millones de años (Ordovícico Superior), que alcanzó la facie de anfibolita, enfriándose por debajo de los 500°C.
- Con relación a la distribución de las zonas mineralizadas, los nódulos de cromita presentan una distribución errática, excepto en dos áreas, Franja San Felipe y la Franja Felipito (Franja Rumicruz-Tomasa-Felipito), encontrándose alineados concordantemente con la orientación de la esquistosidad de dirección NW-SE. Por lo general, los cuerpos mineralizados se presentan en forma discontinua.
- La mineralización de cromita se presenta en tres formas geométricas principales: ***Podiformes (nódulos elongados)***: Es la forma más frecuente y consiste en cuerpos redondeados de diferentes tamaños, desde decimétricos a métricos. Estos nódulos están distribuidos aparentemente en forma errática pero se encuentran emplazados principalmente en las serpentinitas verde amarillentas. ***Vetiformes***:

Con la apariencia de una veta con potencias de 20 cm a 80 cm, en realidad corresponde a una secuencia de nódulos continuos que alcanzan longitudes de hasta 20 metros, relacionados mayormente a estructuras de falla. Si bien tienen apariencia de una veta, pero muestran un buzamiento muy variado, incluso pueden encontrarse plegados. **Estratiformes:** En el área denominada manto aflora cromita de 10 cm a 20 cm de potencia en forma paralela a la esquistosidad y a lo largo de unos 70 metros.

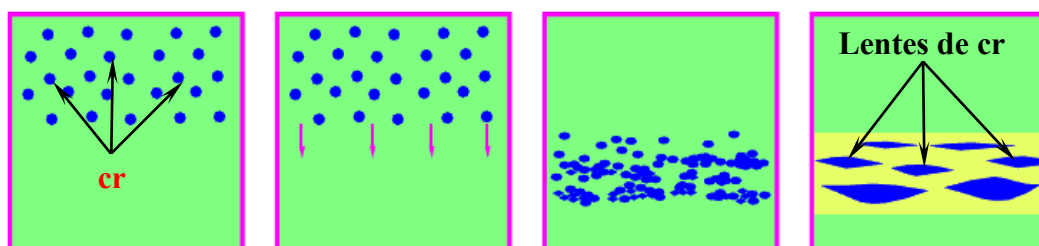
- Las rocas encajonantes que albergan los minerales de cromo son esencialmente serpentinitas que muestran variaciones en su composición, principalmente en el contenido de hierro, las cuales se reflejan en cambios de coloración, textura y comportamiento frente a los esfuerzos tectónicos. Estas rocas son producto de la alteración por hidratación de rocas ultrabásicas primarias, probablemente peridotitas (harzburgitas) y dunitas. Se han distinguido por su coloración tres tipos de serpentinitas: **gris verdosa**, **verde amarillenta**, **verde botella**. Entre ellas existe una gradación de una clase a otra. La mineralización de cromo se encuentra ligada principalmente a las de color verde amarillenta y verde botella.
- Microscópicamente la **serpentinita gris verdosa**, presenta una textura esquistosa, compuesta principalmente por serpentinas de tipo antigorita, cortada por venillas de magnesita, presenta además disseminaciones de pirita, magnetita y algo de cromita. La **serpentinita verde amarillenta**, se muestra bastante deformada, con textura esquistosa, granular, compuesta por antigorita granular, crisotilo fibroso y lizardita de aspecto tabular. Exhibe dos eventos de carbonatación (magnesita) y disseminaciones y venillas de pirita, cromita y espinelas. La **serpentinita verde botella**, igualmente presenta una textura algo menos esquistosa que las otras variedades; además de reticular y granular. Se observan moldes de piroxenos? totalmente reemplazados por serpentinas (bastitas), ilmenita pseudomorfa de espinelas (magnetita?) y venillas de crisotilo cortando solo algunas partes de la roca.
- Las anfibolitas microscópicamente presentan una textura granonematoblástica, mostrando una orientación preferencial de blastos metamórficos de anfíboles, cloritas, biotitas, etc. (máficos) y plagioclasas y/o cuarzo (félsicos); producto de

un metamorfismo regional de grado bajo a medio, de tal forma que la textura original ha sido totalmente borrada. *Winkler* (1978), afirma que la presencia de cloritas en la paragénesis es clave para definir el grado medio-bajo dentro de la facies de la anfíbolita.

- Se observan otras litologías, aunque algo más restringidas, pero que es necesario mencionar, tales como serpentinitas granatíferas, dunitas, esquistos cloritosos, etc.
- La mineralogía presente está conformada fundamentalmente por cromita. Ésta se presenta de dos maneras, masiva como parte de los grandes cuerpos (prácticamente ya explotados en superficie) y con textura cataclástica, constituyendo las llamadas cataclastitas de cromita o cromititas, de aspecto brechoso. Preliminarmente se ha reconocido la presencia de fases minerales como ferritcromita, magnetita, ilmenita, titanita (esfena), pirita, minerales de níquel (pentlandita, skutterudita), calcopirita y pirrotita. Asimismo, los minerales de ganga como antigorita, crisotilo, lizardita. Además stichtita, nimita (cloritas de níquel), granates, relictos de anfíboles, talco, y magnesita.
- Los resultados de los análisis geoquímicos indican la presencia importante de la asociación de los elementos **romo (Cr)**, **níquel (Ni)**, **cobalto (Co)**, **titanio (Ti)**; además de **magnesio (Mg)**, **hierro (Fe)** y **silicio (Si)**. Los rangos de concentraciones para los elementos más importantes fueron, **romo (0.005 % a 19.190 %)**, **níquel (0.089 % a 0.320 %)** y **cobalto (0.018 % a 0.048 %)**. Por otro lado se identificaron las fases minerales: antigorita, cromita y magnetita. Asimismo cromato de magnesio y aluminio, ringwoodita, magnesiocromita, crompticotita, espinela de cobalto y magnesio, nicromita y clinocloro.
- El cromo y níquel se encuentran relacionadas estrechamente a las serpentinitas, tanto en forma diseminada en la masa como el níquel y en ocurrencias nodulares y lenticulares de cromo (cromita) formando concentraciones definidas. Asimismo el cobalto y el titanio se encuentran dispersos y asociados a la masa de serpentinitas.
- Análisis antiguos apoyados con los efectuados actualmente, señalan que las características de las cromitas de Tapo, indican un alto contenido de aluminio (Al) por tanto corresponden al tipo de uso refractario.

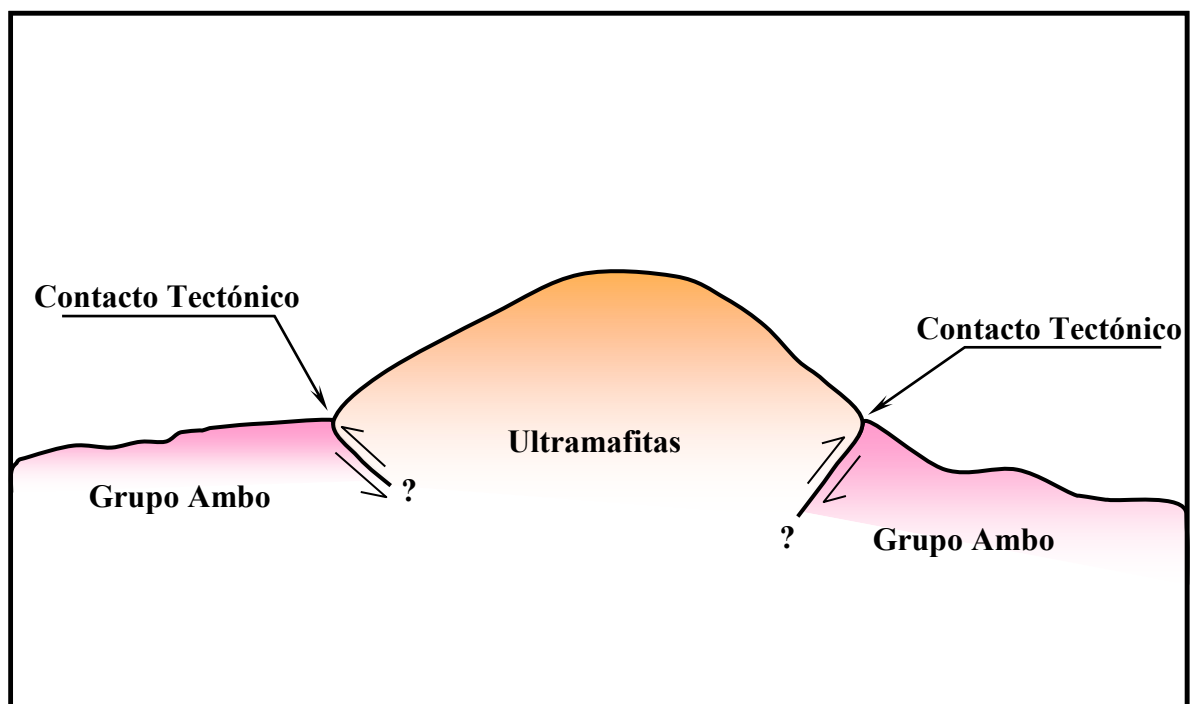
Los resultados obtenidos permiten señalar la siguiente interpretación sobre el origen de las concentraciones de cromo en la zona de Tapo.

- Se considera que el yacimiento ha sido formado por procesos de segregación magmática, producto de la cristalización fraccionada del magma. Tienen su origen en el descenso de la presión y temperatura del magma, causando la precipitación de minerales ricos en hierro (Fe) y magnesio (Mg) y posteriormente los ricos en sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Siendo el magma fluido y su enfriamiento teniendo lugar bajo condiciones de estabilidad tectónica, precipitan olivinos, piroxenos y plagioclasas cálcicas, depositándose en el fondo de la cámara magmática, formando capas de dunitas, peridotitas y gabros. La cromita cristaliza en las primeras etapas, al igual que el olivino y siendo más densa que éste y existir corrientes o flujos de convección intermitentes, puede o no hundirse y depositarse en capas concordantes sobre los minerales ferromagnesianos del fondo de la cámara, llegando a formar cuerpos tabulares. Si las corrientes de convección son de suficiente entidad, los cristales menos densos de olivino se mantienen en suspensión mientras que los de cromita se hunden y acumulan en el fondo de la cámara magmática; por el contrario cuando las corrientes de convección cesan o son muy débiles, los cristales de olivino que estaban en suspensión, pueden depositarse en lechos ricos en olivino. Cuando los movimientos convectivos se inician nuevamente, sólo se depositará cromita, repitiéndose el ciclo y originando de esta manera una estructura bandeada en la que las capas de cromita se intercalan con las de olivino y otros silicatos. Los cuerpos tabulares (**depósitos estratiformes**) así formados, pueden ser rotos debido a movimientos tectónicos, constituyendo cuerpos lenticulares a manera de nódulos alargados (**depósitos podiformes**).



**Figura 6.1.-** Esquema idealizado de la formación de los lentes de cromita (cr) en un magma ultrabásico (Basado en *Smirnov*, 1982).

- En Latinoamérica se tienen ocurrencias importantes de cromo y níquel asociadas a secuencias ofiolíticas como en Cuba, Argentina y Brasil. Asimismo pequeñas concentraciones en Colombia y Ecuador también asociadas a ofiolitas, los cuales difieren del origen de Tapo.
- En el siguiente gráfico se esboza la posible relación entre las ultramafitas de Tapo, las cuales se encuentran a manera de una escama tectónica (klippe), limitadas por fallas inversas o cabalgamientos en contacto tectónico con las secuencias clásticas del Grupo Ambo. Esto sugiere un carácter alóctono para la ocurrencia de rocas ultramáficas serpentinizadas en Tapo.



**Figura 6.2.-** Esbozo idealizado de la posible posición de las ultramafitas de Tapo en contacto tectónico con las rocas del grupo Ambo.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- *Grandin et al.* (1977), *Mégard* (1979) y *Castroviejo* (2006), han propuesto algunas hipótesis sobre el origen del yacimiento. Los dos primeros proponen una naturaleza autóctona para las ocurrencias, en contraparte con el tercero de los mencionados que sugiere que es alóctona. *Castroviejo*, basa su oposición, principalmente, en que el fundido ultrabásico exigiría temperaturas muy altas para ascender, lo cual no se refleja en el grado de metamorfismo que afecta a la litología presente (metamorfismo de grado bajo a medio) y a la elevada densidad de las rocas ultramáficas, lo cual no ayudaría en su ascenso a manera de diapiro (propuesto por *Mégard*). Más bien la relaciona con muchas posibilidades, a un ámbito profundo, mantélico; asociada a la ocurrencia de una deformación interna dúctil pre-andina presente en la serpentinita; además, de la presencia de contactos tectónicos en todo su límite externo con el Grupo Ambo (probables cabalgamientos), los cuales aparecen plegados por la deformación andina.
- La litología presente en Tapo es bastante monótona, constituida principalmente por serpentinitas, producto de la alteración hidrotermal de las ultramafitas (dunitas y peridotitas), marcadas por una esquistosidad penetrativa con dirección predominante NW-SE, éstas a su vez fueron cortadas por cuerpos de anfibolitas, concordantes con la dirección de la esquistosidad, los cuales en algunas zonas conservan ciertas características de su protolito gabroico. Diques de formas tabulares, de composición dacítica y muchos más recientes cortan a las serpentinitas hasta en dos sectores del yacimiento.
- Las serpentinitas en general, exhiben una textura esquistosa, granular y reticular en diferentes grados y dependiendo de la variedad de serpentinita. Algunas veces como en el caso de las serpentinitas verde botella, pueden presentar una textura fanerítica relíctica, mostrando moldes fantasmas de olivinos serpentinizados, piroxenos? (bastitas), totalmente reemplazados por cloritas y/o serpentinas, además de ilmenitas pseudomorfas de espinelas (magnetita) primarias, siguiendo las direcciones de partición (111).
- Las serpentinitas presentan una mineralogía compuesta principalmente por serpentinas de la variedad antigorita, crisotilo y lizardita; consideradas polimorfas

y de fórmula general  $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Presentan como minerales accesorios talco, anfíboles, granates, magnesita (en venillas y escasas disseminaciones), stichtita y nimita (cloritas de níquel).

- Los minerales opacos presentes son: ferritcromita (definida como una transición entre la cromita y la magnetita), magnetita (en algunos casos recristalizada), ilmenita, pirita, skutterudita, pentlandita, pirrotita y calcopirita. Estos se muestran principalmente como finísimas inclusiones en las serpentinitas. Debido a las finas dimensiones de los sulfuros presentes, no ha sido posible una comprobación satisfactoria de la mineralogía, por lo que sería recomendable utilizar otros métodos de instrumentación de análisis mineralógico, como el uso de la microsonda electrónica de barrido.
- La mineralización de cromo se encuentra asociada principalmente a las llamadas serpentinitas verde amarillenta y verde botella, mostrándose como nódulos elongados (boudins), de dimensiones centimétricas a métricas, exponiendo una distribución errática, excepto en dos áreas, la Franja San Felipe y la Franja Felipito (Franja Rumicruz-Tomasa-Felipito), encontrándose alineados de manera concordante; aunque con cierta discontinuidad, con la orientación de la esquistosidad de dirección NW-SE.
- Los estudios mineralógicos realizados en la UNI, a las muestras recolectadas en Tapo, dieron a conocer por vez primera a la especie mineral denominada “**stichtita**”, que corresponde a un carbonato hidratado de cromo y magnesio cuya fórmula química es  $(\text{Mg}_6\text{Cr}_2[(\text{OH})_{16}[\text{CO}_3].4\text{H}_2\text{O}$ , siendo producto de la alteración hidrotermal de la cromita en presencia del  $\text{CO}_2$ . Entre sus características distintivas macroscópicas resaltan su color (lila), hábito (masivo), brillo (céreo a graso), dureza (baja) entre otros y en lo que corresponde a las características microscópicas destacan su relieve (positivo), hábito (fibroso), clivaje (perfecto), color de interferencia (azul-celeste de 2º orden) y birrefringencia (0,026 a 0,027).
- Se tiene la presencia de cuerpos de anfibolitas los cuales a manera de diques cortan a las serpentinitas con dirección NW-SE. Presentan textura granonematoblástica, mostrando una orientación preferencial de blastos metamórficos de anfíboles, cloritas, biotitas, granates, piroxenos y titanita

(máficos) y plagioclasas y/o cuarzo (félsicos); producto de un metamorfismo regional de grado bajo a medio (anfíbolita). Cabe señalar que la presencia de cloritas en la paragénesis, es clave para definir el grado medio-bajo dentro de la facies de la anfíbolita.

- En la zona de Tapo, también se pueden observar otras litologías, aunque algo más restringidas, pero que es necesario mencionar, tales como serpentinitas granatíferas, cataclastitas de cromita (cromititas), dunitas, esquistos cloritosos, entre otros.
- La cromita se presenta de dos maneras, la más importante es la cromita masiva la cual forma parte de los grandes cuerpos (prácticamente ya explotados en superficie) y en menor proporción con textura cataclástica, constituyendo las llamadas cataclastitas de cromita o cromititas.
- Se ha asignado una edad aproximada de 720 millones de años (Pre-Cámbrico), para las ultramafitas de Tapo, asimismo se concluye que hace 450 millones de años (Ordovícico Superior) estas rocas fueron afectadas por un episodio metamórfico, que alcanzó la facie de anfíbolita, enfriándose por debajo de los 500°C.
- Los resultados de los análisis geoquímicos, indican la presencia importante de la asociación de los elementos cromo (Cr), níquel (Ni), cobalto (Co), titanio (Ti); además de magnesio (Mg), hierro (Fe) y silicio (Si). Las concentraciones obtenidas para los elementos más importantes fueron, cromo 0.005 % a 19.190 %, níquel 0.089 % a 0.320 % y cobalto 0.018 % a 0.048 %. Por otro lado se identificaron las fases minerales: antigorita, cromita y magnetita. Asimismo cromato de magnesio y aluminio, ringwoodita, magnesiocromita, crompicotita, espinela de cobalto y magnesio, nicromita y clinocloro. Estas últimas fases deben ser confirmadas mediante métodos como la microscopía electrónica.
- Los análisis antiguos apoyados con los efectuados actualmente, señalan que las características de las cromitas de Tapo, presentan un alto contenido de aluminio (Al) por lo cual su uso industrial corresponde principalmente como material refractario.

- Los métodos geofísicos como la gravimetría, podrían ser una gran ayuda para la búsqueda en profundidad de más cuerpos de cromita. Se sugiere este método debido al gran contraste entre las densidades de la cromita (4,6) y las serpentinitas (2,5 - 2,6), lo que podría mostrar la presencia de anomalías positivas e inferir la ocurrencia de cuerpos masivos de cromita.
- En Latinoamérica se tienen ocurrencias importantes de cromo y níquel asociadas a secuencias ofiolíticas como en Cuba, Argentina y Brasil. Asimismo pequeñas concentraciones en Colombia y Ecuador también asociadas a ofiolitas, los cuales difieren claramente con respecto al origen de los cuerpos de cromita de Tapo.

## Referencias Bibliográficas

**Acevedo, R.; Villar, L.; Gervilla, F.; Donnari, E. & Hach-Alí, P. (1999)**  
Microanálisis químicos cuantitativos en las facies wehrlítica del Complejo Novillo Muerto (Provincia de Mendoza). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. 54, N° 2, Junio 1999, p. 132-138.

**Best, M. (1982)**  
Igneous and Metamorphic Petrology. *W. H. Freeman and Company, New York*, 630 p.

**Brown, T.; Walters, A.; Idoine, N.; Shaw, R.; Wrighton C. & Bide T. (2012)**  
World Mineral Production 2006-2010. *British Geological Survey. Natural Environment Research Council. Halstan & Co Ltd, Amersham, Buckinghamshire*, 78 p.

**Carrascal, R.; Uribe, R.; Macedo, J. & Cerrón, P. (2007)**  
Petrología, Distribución y Génesis de la Ocurrencia de Cromo y Níquel en Tapo. Tarma-Perú. *Proyecto de Investigación. FIGMM - Escuela de Geología, Universidad Nacional de Ingeniería*, 37 p.

**Castro, A. (1989)**  
Petrografía Básica. Texturas, clasificación y nomenclatura de rocas. *Paraninfo S.A., Madrid*, 143 p.

**Castroviejo, R. (2006)**  
Investigación Geológico-Minera del Complejo Ultramáfico de Tapo y de su Potencial como Metalotecto de Cr, Ni, Cu, Au, y EGP (Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Os). *Informe Final. Investigación conjunta UPM – UNI (Escuela de Geología – Gabinete de Yacimientos Minerales)*.

**Castroviejo, R.; Rodrigues, J.; Carrascal, R.; Chirif, H.; Acosta, J. & Uribe, R. (2009)**  
Mineralogía del Macizo Ultramáfico de Tapo (Cordillera Oriental Andina, Perú). *Sociedad Española de Mineralogía, Macla N° 11*, p. 55-56.

**Castroviejo, R.; Rodrigues, J.; Acosta, J.; Pereira, E.; Romero, D.; Quispe, J. & Espí, J. (2009)**  
Geología de las ultramafitas pre-andinas de Tapo y Acobamba, Tarma, Cordillera Oriental del Perú. *Sociedad Geológica de España, Geogaceta N° 46*, p. 11-14.

**Dalmayrac, B.; Laubacher, G. & Marocco, R. (1977)**  
Caractères Généraux de l'Évolution Géologique des Andes Péruviennes. *Tesis Montpellier y Memoires ORSTOM*.

**Dalmayrac, B.; Laubacher, G. & Marocco, R. (1988)**

Caracteres Generales de la Evolución Geológica de los Andes Peruanos. *Bol. Inst. Geol. Min. Metal. Perú, Serie "D", N° 12, 313 p.*

**Deer, W.; Howie, R. & Zussman, J. (1992)**

An Introduction to the Rock-Forming Minerals. *2nd Edition, Pearson Education Limited, Edimburg Gate - England, 696 p.*

**Evans, A. (1987)**

An introduction to ore geology. *Ed. Blackwell Scientific Publications, 358 p.*

**Fanlo, I.; Gervilla, F.; Castroviejo, R.; Rodrigues, F.; Acosta, J.; Pereira, E. & Uribe, R. (2009)**

Metamorphism of chromitites in the Tapo ultramafic massif, Eastern Cordillera, Peru. *Artículo inédito, 10th Biennial SGA Meeting, Australia 2009, 3 p.*

**Febrel, T. (1970)**

Microscopía de Minerales Opacos. *E.T.S. de Ingenieros de Minas - Madrid, Departamento de Publicaciones (Edición Provisional), 103 p.*

**Fleischer, M. (1980)**

Glossary of Mineral Species 1980. *The Mineralogical Record P.O. Box 35565, Tucson, Arizona 85740, 192 p.*

**Grandin, G.; Aumaitre, R.; Huamán, A. & Vilca, C. (1977)**

Exploración por Rocas Ultrabásicas en la Cordillera Oriental. *Acción Conjunta ORSTOM-INGEOMIN. Convenio 1973-1976, Informe Final, 3° Parte, 21 p.*

**Harrison, J. (1943)**

Geología de los Andes Centrales en parte del Departamento de Junín, Perú. Estudio Definitivo. *Bol. Soc. Geol. Perú, Tomo XVI, Lima, p. 7-51.*

**Hernández, H. (1991)**

Estudio Geológico de la mina San Felipe. Tapo-Tarma. *Informe Interno. Refractarios Peruanos S.A. (REPSA), 80 p.*

**Hernández, H. (2005)**

Evaluación Geológica-Económica de la mina San Felipe. Tarma. *Informe Interno. Refractarios Peruanos S.A. (REPSA), 22 p.*

**Iberico, M. (1958)**

Tapo chromite final report. *Informe interno. Cerro de Pasco Corporation, 24 p.*

**Ineson, P. (1989)**

Introduction to Practical Ore Microscopy. *John Wiley & Sons, Inc., New York, 181 p.*

**Jenks, W. (1951)**

Triassic to Tertiary Stratigraphy near Cerro de Pasco, Perú. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 62, p. 203-219.

**Lipin, B. & Thayer, T. (1978)**

The Outlook for Small Chromite Mines. The small scale mining of the World Conference, Jurica (Méjico). *United Nations Institute for Training & Research*, p. 169-197.

**Lunar, R. & Oyarzún, R. (1991)**

Yacimientos Minerales. Técnicas de estudio – Tipos – Evolución metalogenética – Exploración. *Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid*, 938 p.

**Lunceford, H. (1965)**

Tarma chromite property. *Informe Interno. Refractarios Peruanos S.A. (REPSA)*, 16 p.

**Martínez, J. (2002)**

Geología Estructural y Dinámica Global. (Curso 2002/2003). *Departamento de Geología. Universidad de Salamanca*.

**McLaughlin, D. (1924)**

Geology and Physiography of the Peruvian Cordillera, Departments of Junin and Lima. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 35, p. 591-632.

**Medrano, O. (1992)**

Investigación por cromita en la mina San Felipe - Tarma. *Informe de Experiencia Profesional. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Univ. Nac. de Ingeniería, Lima*, 34 p.

**Mégard, F. (1968)**

Geología del cuadrángulo de Huancayo. *Bol. Serv. Geol. Min. Perú*, N° 18, 123 p.

**Mégard, F.; Dalmayrac, B.; Laubacher, G.; Marocco, R.; Martínez, C.; Paredes, J. & Tomasi, P. (1971)**

La chaîne hercynienne au Pérou et en Bolivie, premiers résultats. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, III (1), 1 carte, Paris, p. 5-44.

**Mégard, F. (1973)**

Etude Géologique d'une transversale des Andes au niveau du Pérou Central. *Thèse Doct. Ès Sci. Nat., Montpellier*, 263 p.

**Mégard, F. (1979)**

Estudio Geológico de los Andes del Perú Central. *Bol. Inst. Geol. Min. Metal. Perú*, Serie "D", N° 8, 245 p.

**Mégard, F.; Caldas, J.; Paredes, J. & De La Cruz, N. (1996)**

Geología de los cuadrángulos de Tarma, La Oroya y Yauyos. *Bol. Inst. Geol. Min. Met. Perú, Serie "A", N° 69, 293p.*

**Melgarejo, J. (2003)**

Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. *Publicacions de la Universitat de Barcelona, Fundació Folch (Barcelona), Barcelona, 1072 p.*

**Monterrubio, S. (1991)**

Mineralizaciones asociadas a Rocas Ultrabásicas en el Hercínico Español. *Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 322p.*

**Moody, J. (1976)**

Serpentinization: a review. *Lithos, vol. 9, issue 2, p. 125-138.*

**Newell, N.; Chronic, J. & Roberts, T. (1953)**

Upper Paleozoic of Peru. *Geol. Soc. Amer., Mem. 58, 276 p.*

**Palacios, O.; Chacón, N.; Sánchez, A.; León W.; Canchaya, S. & Aranda, A. (1995)**

Geología del Perú. *Bol. Inst. Geol. Min. Met. Perú, Serie "A", N° 55, 177 p.*

**Paredes, J.; Romero, D. & Uribe, R. (2006)**

Informe de Salida al Campo. *Informe Interno. Curso: Análisis Estructural aplicado a la Interpretación Geológica y a la Investigación de Depósitos Minerales (R-6). Programa Internacional Máster en Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales, 15 p.*

**Ramdohr, P. (1969)**

The ore minerals and their intergrowths. *Pergamon Press Ltd. Headington Hill Hall, Oxford 4 & 5 Fitzroy Square, London W. 1, 3<sup>rd</sup> Edition, 1174 p.*

**Schouten, C. (1962)**

Determinative tables for ore microscopy. *Elsevier Amsterdam, 242 p.*

**Smirnov, V. (1982)**

Geología de Yacimientos Minerales. *Ed. MIR, 654 p.*

**Stewart, J.; Evernden, J. & Snelling, N. (1974)**

Age determinations from Andean Peru: a reconnaissance survey. *Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 85, p. 1107-1116.*

**Tassinari, C.; Castroviejo, R.; Rodrigues, J.; Acosta, J. & Pereira, E. (2011)**

A Neoproterozoic age for the chromitite and gabbro of the Tapo ultramafic Massif, Eastern Cordillera, Central Peru and its tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences. Article in Press.*



**Turner, J. (1970)**

The Andes of northwestern Argentina. *International Journal of Earth Sciences, Springer Berlin / Heidelberg*. vol. 59, N° 3, p. 1028-1063.

**Uribe, R. (1992)**

Informe de Prácticas Pre-Profesionales. *Refractarios Peruanos S.A. (REPSA)*, 35 p.

**Uytenbogaardt, W. & Burke, E. (1971)**

Tables for Microscopic Identification of Ore Minerals. *Elsevier Publishing Company, Amsterdam*, 430 p.

**Vásquez, F. (1996)**

Geología económica de los recursos minerales. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, España*, 481 p.

**Wicks, F. & Whittaker, E. (1977)**

Serpentine textures and serpentinization. *The Canadian Mineralogist*, vol 15, p. 459-488.

**Winkler, H. (1978)**

Petrogénesis de Rocas Metamórficas. *H. Blume Ediciones, Madrid*, 348 p.

**Zeller, R. (1966)**

Exploration of the Tapo chromite property near Tarma, Peru. *Informe Interno. Refractarios Peruanos S.A. (REPSA)*, 23 p.

## Referencias Electrónicas

### **Anthony, J.; Bideaux, R.; Bladh K. & Nichols, M. (2010)**

El “Handbook of Mineralogy”, es una serie de cinco volúmenes establecido por los autores mencionados y publicado por el “Mineral Data Publishing”. Los derechos de autor para el “Handbook of Mineralogy”, fueron dados en el 2001 por la “Mineralogical Society of America” (MSA), junto con los derechos de autor, el MSA brinda los archivos pdf de cada página del manual, distribuyéndolo gratuitamente al público en esta página web. *Disponible en <http://www.handbookofmineralogy.org>*

### **Barthelmy, D. (2009)**

Es una base de datos de minerales creada en 1996 y actualizada al 31 de Diciembre del 2009. Contiene 4714 descripciones de especies minerales, vinculadas a cuadros dedicados a la cristalografía, estructuras cristalinas, difracción de rayos X, composición química, propiedades físicas y ópticas, la clasificación de Dana Nueva, la clasificación de Strunz, imágenes de muestra de minerales, y listados en orden alfabético de las especies de minerales, además con enlaces a una amplia biblioteca de imágenes. *Disponible en <http://www.webmineral.com>*

### **Ralph, J. & Chau, I. (2010)**

Mindat.org, es un recurso de información en línea dedicado a proveer información mineralógica gratuita para todos. MINDAT se basa en las contribuciones de cientos de miembros y simpatizantes. *Disponible en <http://www.mindat.org>*

### **Schorn, S. (2010)**

Mineralienatlas, es un proyecto sin interés comercial, hecho de y para visitantes, creado en 1999. Nuestras tareas principales son mineralogía, paleontología y yacimientos de minerales. En este sitio se encontrará una lista casi completa de minerales aprobados por el IMA (International Mineralogy Association). *Disponible en <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralienInformationen>*

## **Bibliografía Complementaria**

**Bucher, K. & Frey M. (1994)**

Petrogenesis of Metamorphic Rocks. *6<sup>th</sup> Edition. Complete Revision of Winkler's Textbook, Springer-Verlag, Berlin, 318 p.*

**Cameron, E. (1961)**

Ore Microscopy. *John Wiley & Sons, Inc., New York, 293p.*

**Castroviejo, R. (1998)**

Fundamentos de Petrografía. *Red ALEMYMA, Programa ALFA, UE / DGI. Departamento de Ingeniería Geológica. E.T.S. Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 116 p.*

**Craig, J. & Vaughan, D. (1981)**

Ore Microscopy and Ore Petrography. *John Wiley & Sons, Inc., New York, 181p.*

**Huang, W. (1991)**

Petrología. *Unión tipográfica Editorial Hispano-Americana S.A. de C.V. Editorial LIMUSA, S.A. de C.V., 546 p.*

**Jambor, J. & Vaughan, D. (1990)**

Advanced Microscopic Studies of Ore Minerals. *Short Course Handbook. Mineralogical Association of Canada, Volume 17, 426 p.*

**Kornprobst, J. (1996)**

Manual de petrología metamórfica y su contexto geodinámico. *Masson S.A. Barcelona, 220 p.*

**MacKenzie, W. & Adams, A. (1997)**

Atlas en Color de Rocas y Minerales en Lámina Delgada. *Masson S.A., Barcelona, 215 p.*

**Marshall, D. Anglin, C. & Mumin H. (2004)**

Ore Mineral Atlas. *Geological Association of Canada – Mineral Deposits Division, 112p.*

**Perales, F. (1994)**

Glosario y Tabla de Correlación de las Unidades Estratigráficas del Perú. *Auspiciado por: VII Congreso Peruano de Geología, 177 p.*

**Perkins, D. & Henke, K. (2002)**

Minerales en Lámina Delgada. *Pearson Educación S.A., Madrid, 238 p.*

**Picot, P. & Johan, Z. (1982)**

Atlas of ore Minerals. *Elsevier scientific publishing Co, P.O. Box 330-1000 AH – Amsterdam (Netherlands), 458 p.*

**Rodrigues, J.; Acosta, J.; Castroviejo, R.; Quispe, J.; Romero, D.; Uribe, R. & Campián, M. (2010)**

Geología y Estructura de las ultramafitas de Tapo y Acobamba (Tarma, Perú). Removilización tectónica andina de un segmento ofiolítico pre-andino. *Presentado al XV Congreso Peruano de Geología, Cusco, septiembre. 2010, 4 p.*

**Spry, P. & Gedlinske, B. (1987)**

Tables for the Determination of Common Opaque Minerals. *Econ. Geol.*, 52p.

**Winter, J. (2001)**

An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. *Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458, 697 p.*