

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**



# **ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN DEL YACIMIENTO LOMA DE HIERRO, ESTADO MIRANDA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ricardo Alezones

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por la Br. Birbe H., Narkys V.  
para optar al Título  
de Ingeniero Geólogo

Caracas, marzo 2009

***ACTA***

Caracas, marzo de 2009.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por la Br. Narkys Birbe, titulado:

***“Actualización geológica de la zona de explotación del yacimiento Loma de Hierro, estado Miranda ”***

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

---

**Prof. Ricardo Alezones**  
**Tutor Académico**

---

**Prof. Sebastian Grande**

---

**Prof. William Melendez**

## ***AGRADECIMIENTOS***

- A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por formar parte de esta institución.
- Al Prof. Ricardo Alezones, por su valiosa ayuda y asesoramiento en este trabajo.
- Al Prof. Sebastian Grande, por su aporte de conocimientos en este trabajo.
- Al Prof. William Melendez, por sus importantes observaciones realizadas como Jurado de este trabajo.
- A la empresa Minera Loma de Níquel, por haber realizado este trabajo en sus instalaciones.
- A Nell Chávez, por su colaboración y apoyo en la elaboración de este trabajo.
- A Ingrid Matute, por haber hecho posible mi pasantía en Minera Loma de Níquel.
- A Yeixy Noguera, por haber sido una excelente compañera durante mi pasantía en la empresa.
- A la gente de la mina que mi brindó su apoyo... especialmente a los muchachos de perforación (Roberto, Freddy, Manuel, José Luis), a todos los mecánicos, a la gente de topografía, a los operadores, a las pasantes Belladiva y María José.

**Birbe H., Narkys V.**

**ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA  
DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN DEL  
YACIMIENTO LOMA DE HIERRO, ESTADO MIRANDA**

**Tutor Académico: Prof. Ricardo Alezones. T.E.G. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2009, 94 pp.**

El propósito del trabajo es ampliar el conocimiento geológico de la zona de explotación del yacimiento niquelífero Loma de Hierro, mediante descripción petrográfica y análisis químico de muestras de roca fresca recolectadas en el área, la cual presenta una extensión de unos 4 km<sup>2</sup>, y se encuentra conformada por la unidad ígnea Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro.

Se realizó un recorrido de superficie para el reconocimiento geológico de la zona, dividiéndose la misma en cuatro estaciones de trabajo, dentro de las cuales fueron muestreados aquellos afloramientos de roca con los menores grados de alteración (litología menos serpentinizada y menos meteorizada), obteniéndose un total de diez muestras.

La descripción petrográfica, realizada por medio de secciones finas, permitió observar la composición mineralógica y los rasgos texturales de las muestras; se llevó a cabo un conteo modal de olivino, para fines de elaboración de un mapa de distribución local del contenido olivinífero en las rocas. Por su parte, el análisis químico fue realizado con Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivo Acoplado, obteniéndose los porcentajes en peso de los componentes mayoritarios y minoritarios de las muestras.

De las diez muestras estudiadas, nueve (correspondientes a un 90%) son harzburgita con espinela, con grado variable de serpentización, y la muestra restante (que corresponde a un 10%) es un gabro olivínico cumulativo (crescumulado de piroxeno y olivino con heteroadcumulado de plagioclasa), metasomatizado, encontrado como canto rodado. La peridotita está constituida por porfiroclastos de ortopiroxeno-bastita en una matriz olivínica alterada a serpentina y oxihidróxidos de hierro, con minerales del grupo de la espinela como accesorios (opacos y Cr-espinela). El gabro está compuesto por cristales de plagioclasa cálcica muy alterada, clinopiroxeno (diópsido) y olivino, de grano medio a fino, dispuestos en forma estratiforme, los cuales se encuentran saussuritizados, serpentinizados y cloritizados, encontrándose minerales opacos como accesorios.

Los tipos litológicos obtenidos, probablemente forman parte de una secuencia ofiolítica. La mineralogía secundaria indica que han sufrido alteración metasomática hidrotermal y meteorización.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivo general .....	1
1.2. Objetivos específicos .....	1
1.3. Limitaciones .....	2
1.4. Contexto de Minera Loma de Níquel .....	2
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>3</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>4. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	<b>11</b>
4.1. Ubicación y extensión del área de estudio .....	11
4.2. Características topográficas .....	13
4.3. Características climáticas .....	14
4.4. Perfil de meteorización del yacimiento Loma de Hierro .....	14
4.5. Geología regional .....	17
4.6. Formación Tiara .....	18
4.7. Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro .....	20
4.8. Geología estructural regional .....	21
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
5.1. Revisión bibliográfica-cartográfica .....	22
5.2. Levantamiento de campo .....	23
5.3. Análisis de muestras .....	26
5.4. Procesamiento de datos .....	28
5.5. Redacción del informe final y presentación del trabajo .....	31
<b>6. RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
6.1. Estación # 1 .....	32
6.1.1. Ubicación y extensión .....	32
6.1.2. Descripción de campo .....	32
6.1.3. Descripción petrográfica .....	33
Muestra 4538/936 .....	33
Muestra 4927/722 .....	35
6.2. Estación # 2 .....	37
6.2.1. Ubicación y extensión .....	37
6.2.2. Descripción de campo .....	38
6.2.3. Descripción petrográfica .....	39
Muestra 5644/1053 .....	39
Muestra 6107/781 .....	41
Muestra 6423/1253 .....	43
Muestra 6548/943 .....	44
6.3. Estación # 3 .....	46

6.3.1. Ubicación y extensión .....	46
6.3.2. Descripción de campo .....	47
6.3.3. Descripción petrográfica .....	47
Muestra 7294/847 .....	47
Muestra 7396/588 .....	49
Muestra 7570/899 .....	51
6.4. Estación # 4 .....	53
6.4.1. Ubicación y extensión .....	53
6.4.2. Descripción de campo .....	53
6.4.3. Descripción petrográfica .....	53
Muestra 8377/991 .....	53
<b>7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
<b>8. SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>69</b>
8.1. Sumario .....	69
8.2. Conclusiones .....	70
8.3. Recomendaciones .....	71
<b>9. APÉNDICES.....</b>	<b>72</b>
<b>10. GLOSARIO .....</b>	<b>74</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>78</b>
<b>12. ANEXOS .....</b>	<b>82</b>

## ***LISTA DE FIGURAS***

<b>Figura 1.</b> Secuencia idealizada de las asociaciones ofiolíticas .....	<b>6</b>
<b>Figura 2.</b> Mecanismos de emplazamiento de ofiolitas .....	<b>7</b>
<b>Figura 3.</b> Corte vertical mostrando los horizontes que se desarrollan sobre un cuerpo ofiolítico	<b>9</b>
<b>Figura 4.</b> Ubicación relativa del yacimiento Loma de Hierro .....	<b>11</b>
<b>Figura 5.</b> Ubicación geográfica del yacimiento Loma de Hierro .....	<b>12</b>
<b>Figura 6.</b> Ubicación de los sectores que conforman la zona de explotación del yacimiento ....	<b>13</b>
<b>Figura 7.</b> Corte vertical mostrando los niveles del yacimiento Loma de Hierro .....	<b>16</b>
<b>Figura 8.</b> Napas tectónicas de la Serranía del Interior .....	<b>17</b>
<b>Figura 9.</b> Área de afloramiento de la ofiolita Loma de Hierro .....	<b>21</b>
<b>Figura 10.</b> Mapa de ubicación de las estaciones de trabajo .....	<b>23</b>
<b>Figura 11.</b> Mapa de ubicación de las muestras .....	<b>25</b>
<b>Figura 12.</b> Carta comparativa para estimación visual de porcentajes .....	<b>27</b>
<b>Figura 13.</b> Planilla para petrografía de rocas ígneas .....	<b>27</b>
<b>Figura 14.</b> Diagrama de clasificación para rocas ultramáficas .....	<b>29</b>
<b>Figura 15.</b> Diagramas de clasificación para rocas gabroicas .....	<b>30</b>
<b>Figura 16.</b> Mapa de distribución local del contenido de olivino en las rocas .....	<b>60</b>
<b>Figura 17.</b> Gráfico de composición mineralógica promedio de la litología .....	<b>62</b>
<b>Figura 18.</b> Gráfico de composición química promedio de la litología .....	<b>68</b>
<b>Figura 19.</b> Diagrama de la técnica ICP-OES .....	<b>72</b>

## ***LISTA DE TABLAS***

<b>Tabla 1.</b> Ubicación de las estaciones de trabajo .....	<b>24</b>
<b>Tabla 2.</b> Ubicación de las muestras .....	<b>26</b>
<b>Tabla 3.</b> Composición mineralógica aproximada de las muestras .....	<b>59</b>
<b>Tabla 4.</b> Porcentajes modales de olivino en las muestras .....	<b>59</b>
<b>Tabla 5.</b> Rasgos texturales presentes en las muestras .....	<b>59</b>
<b>Tabla 6.</b> Tipos litológicos presentes .....	<b>61</b>
<b>Tabla 7.</b> Composición mineralógica promedio de la litología .....	<b>62</b>
<b>Tabla 8.</b> Composición química promedio de la litología .....	<b>68</b>

### ***LISTA DE FOTOGRAFÍAS***

<b>Fotografía 1.</b> Muestra de mano 4538/936 .....	<b>33</b>
<b>Fotografía 2.</b> Muestra de mano 4927/722 .....	<b>35</b>
<b>Fotografía 3.</b> Afloramientos en la Estación #2, indicándose el plano de falla .....	<b>38</b>
<b>Fotografía 4.</b> Muestra de mano 5644/1053 .....	<b>39</b>
<b>Fotografía 5.</b> Muestra de mano 6107/781 .....	<b>41</b>
<b>Fotografía 6.</b> Muestra de mano 6423/1253 .....	<b>43</b>
<b>Fotografía 7.</b> Muestra de mano 6548/943 .....	<b>44</b>
<b>Fotografía 8.</b> Muestra de mano 7294/847 .....	<b>47</b>
<b>Fotografía 9.</b> Muestra de mano 7396/588 .....	<b>49</b>
<b>Fotografía 10.</b> Muestra de mano 7570/899 .....	<b>51</b>
<b>Fotografía 11.</b> Muestra de mano 8377/991 .....	<b>53</b>

## ***LISTA DE FOTOMICROGRAFÍAS***

<b>Fotomicrografía 1.</b> Muestra 4538/936, Matriz olivínica en la harzburgita, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>35</b>
<b>Fotomicrografía 2.</b> Muestra 5644/1053, Porfidoclasto de Cr-espínela en la harzburgita, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>40</b>
<b>Fotomicrografía 3.</b> Muestra 6107/781, Olivino alterado a oxihidróxidos de hierro en la harzburgita, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>42</b>
<b>Fotomicrografía 4.</b> Muestra 6548/943, Porfidoclasto de ortopiroxeno-bastita en la harzburgita, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>46</b>
<b>Fotomicrografía 5.</b> Muestra 7294/847, Matriz olivínica en la harzburgita, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>49</b>
<b>Fotomicrografía 6.</b> Muestra 7396/588, Vetillas de opacos orientados con la serpentina en la harzburgita, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>51</b>
<b>Fotomicrografía 7.</b> Muestra 8377/991, Plagioclasa saussuritizada en el gabro olivínico, 20X/0.40P, nícoles X y II .....	<b>54</b>
<b>Fotomicrografía 8.</b> Muestra 8377/991, Plagioclasa anhedral rodeada por clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>55</b>
<b>Fotomicrografía 9.</b> Muestra 8377/991, Plagioclasa anhedral rodeada por olivino en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>55</b>
<b>Fotomicrografía 10.</b> Muestra 8377/991, Cristal de clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>56</b>
<b>Fotomicrografía 11.</b> Muestra 8377/991, Cristal de clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>56</b>
<b>Fotomicrografía 12.</b> Muestra 8377/991, Lamelas de exsolución de ortopiroxeno en clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>56</b>
<b>Fotomicrografía 13.</b> Muestra 8377/991, Cristal de olivino en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>57</b>
<b>Fotomicrografía 14.</b> Muestra 8377/991, Vetillas de serpentina, clorita y opacos en el olivino en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II .....	<b>57</b>
<b>Fotomicrografía 15.</b> Muestra 8377/991, Grano de epidoto en el gabro olivínico, como producto de saussuritización de la plagioclasa, 20X/0.40P, nícoles X y II .....	<b>58</b>

## ***1. INTRODUCCIÓN***

El presente trabajo surge de la necesidad de ampliar el conocimiento geológico de la zona de explotación del yacimiento niquelífero Loma de Hierro, y de esta manera actualizar y complementar la base de datos geológicos de Minera Loma de Níquel, como actual empresa encargada de las actividades operativas en este yacimiento, con el fin de optimizar el modelo geológico utilizado en las labores de prospección y extracción mineral. Así mismo, este trabajo representa un aporte general a la geología nacional.

### ***1.1. OBJETIVO GENERAL***

- Realizar una actualización de datos geológicos de la zona de explotación del yacimiento Loma de Hierro, estado Miranda.

### ***1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS***

- Realizar una descripción petrográfica de muestras de roca fresca recolectadas en la zona, por medio de análisis de secciones finas.
- Realizar un análisis químico de las muestras para complementar la descripción petrográfica.
- Definir los tipos litológicos que conforman la zona, y establecer la distribución local de los mismos.
- Presentar un mapa de distribución local del contenido de olivino en las rocas.
- Presentar un mapa geológico de la zona, a escala 1:5000.
- Determinar la relación existente entre los distintos tipos litológicos, a fin de reconocer la petrogénesis de las rocas estudiadas.

### **1.3. LIMITACIONES**

La cantidad de muestras recolectadas estuvo limitada por la existencia de afloramientos de roca lo suficientemente fresca, dentro de la zona de explotación del yacimiento, considerando que las unidades de roca basal no se encuentran expuestas con suficiente frecuencia y continuidad, observándose mayormente los niveles de alteración litológica (laterita níquelífera y laterita ferruginosa).

### ***1.4. CONTEXTO DE MINERA LOMA DE NÍQUEL C.A.***

La empresa Minera Loma de Níquel (MLdN) inicia sus operaciones a finales del año 2000, formando parte del *Grupo Anglo American PLC*. Es la única empresa dedicada a la producción y mercadeo de níquel a nivel nacional. La producción se encuentra en el orden de 17.500 toneladas por año de aleación de ferroníquel de bajo carbón (MLdN, 2007).

La explotación del yacimiento es realizada a cielo abierto utilizando el método de excavaciones por terrazas con una altura aproximada de 5 metros y un ángulo máximo de taludes de 34 grados. El procesamiento de níquel se basa en la técnica pirometalúrgica sin utilización de aditivos químicos (MLdN, 2007).

La extracción máxima de mineral es de 1,3 millones de toneladas secas al año, por un período de treinta años, con un tenor de níquel que varía comúnmente entre 1,1 % y 1,8 % (MLdN, 2007).

El material extraído es trasladado hasta la planta procesadora, donde es triturado y secado hasta alcanzar un tamaño máximo de 10 mm. Luego, usando carbón, este material es pre-reducido en dos calcinadores rotatorios, y posteriormente, es alimentado a los hornos AC de arco eléctrico, donde es licuado y separado de la escoria. El proceso está programado para producir una colada de ferroníquel cada 4 horas, el cual es refinado en las fases finales del proceso (MLdN, 2007).

## **2. ANTECEDENTES**

A continuación se indica, en orden cronológico, los principales trabajos realizados en años anteriores, que aportan información geológica del área:

- **Bellizzia (1967):**

Presenta un trabajo sobre las rocas ultramáficas en el sistema montañoso del Caribe y yacimientos minerales asociados, donde se incluye Loma de Hierro. De acuerdo con este autor, el área se encuentra conformada por un cuerpo de peridotita, localmente intrusionado por diques de piroxenita y gabro.

- **Lavié (1967):**

Presenta una evaluación de los yacimientos de lateritas níquelíferas en Loma de Hierro. En base al estudio de pozos exploratorios, este autor realiza la zonificación del yacimiento, dividiéndolo en cuatro zonas: laterita ferruginosa (zona 1), laterita níquelífera (zona 2), serpentinita níquelífera (zona 3) y peridotita con grado variable de serpentinización (zona 4).

- **Graterol (1967, 1972):**

Realiza una investigación petrográfica y mineralógica de las peridotitas y serpentinitas de Loma de Hierro, y estudia su petrogénesis. De acuerdo con este autor, se presenta una intrusión de peridotita tipo harzburgita-lherzolita, con grado variable de serpentinización, dividiéndose la litología en cuatro tipos: serpentinita totalmente alterada (tipo I), serpentinita parcialmente alterada (tipo II), peridotita serpentinizada (tipo III) y peridotita ligeramente serpentinizada (tipo IV).

- **Teggin *et al.* (1985):**

Presenta un estudio geoquímico de las lateritas níquelíferas de Loma de Hierro. Los autores concluyen que la roca original se encuentra constituida por olivino, piroxeno, cromita y serpentina, con goethita, hematita y gibbsita, como eventuales productos de meteorización.

- **Minera Loma de Níquel, MLdN (2004):**

Presenta un reporte geológico inédito del yacimiento Loma de Hierro. De acuerdo con este trabajo, existe una intrusión ultramáfica, profundamente serpentinizada. Además, se divide el yacimiento en tres niveles fundamentales: laterita ferruginosa (nivel 1), laterita níquelífera (nivel 2) y roca basal (nivel 3).

- **Pirela (2007):**

Realiza un estudio químico y petrográfico de un perfil laterítico asociado a la laterita níquelífera de Loma de Hierro (Trabajo Especial de Grado, sin publicar). De acuerdo con este trabajo, el yacimiento se encuentra dividido en cuatro zonas: zona de laterita, zona de mineral mena, zona de serpentinita y zona de peridotita serpentinizada, las cuales presentan composiciones química y mineralógica particulares.

### **3. MARCO TEÓRICO**

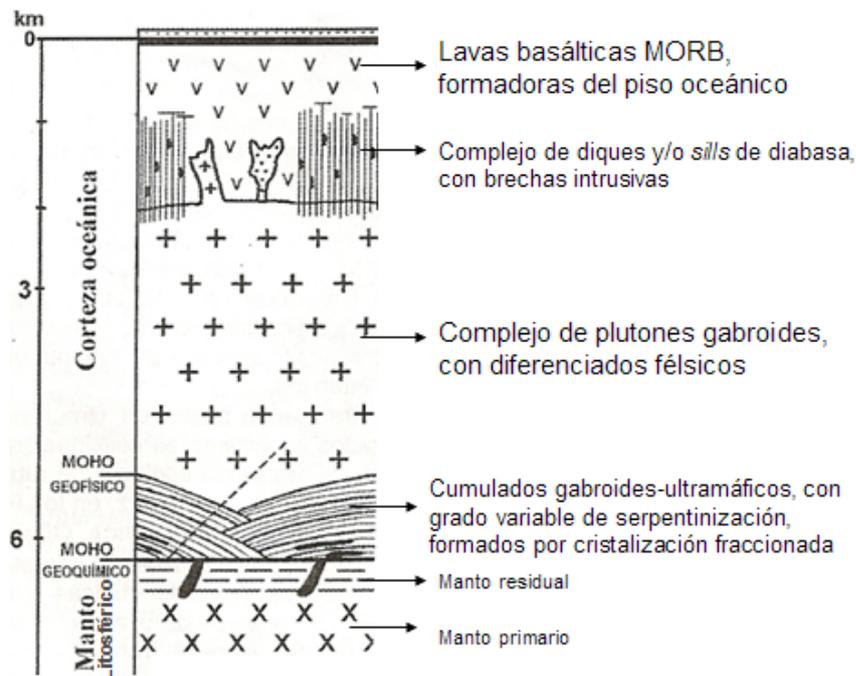
Los yacimientos lateríticos de níquel, entre los cuales se incluye Loma de Hierro, consisten en espesos suelos residuales enriquecidos con una mena niquelífera, originados por intensa meteorización de cuerpos de rocas ígneas ultramáficas de gran volumen y/o extensión areal, pertenecientes a asociaciones ofiolíticas, en condiciones de clima tropical húmedo y relieve moderado. Se caracterizan por presentar menas de relativo bajo tenor (0,8-5% de níquel, con promedio de 2%) (Lavié, 1967; Grande, 2000b).

Las asociaciones ofiolíticas son conjuntos litológicos formados por la solidificación de un magma generado en márgenes tectónicos divergentes (centros de expansión oceánica), los cuales son emplazados posteriormente en márgenes tectónicos convergentes. La secuencia idealizada de las asociaciones ofiolíticas (*ver Fig. 1*), se describe a continuación, de tope a base (Ehlers y Blatt, 1982; Grande, 2000a):

- Lavas basálticas tholeíticas (*midocean ridge basalts*), almohadilladas, formadoras del piso oceánico, las cuales fueron inyectadas desde una cámara magmática relativamente somera.
- Diques y/o *sills* de diabasa en basalto, con brechas intrusivas, los cuales representan los conductos alimentadores de los flujos basálticos, que eventualmente solidificaron.
- Plutones gabroides de grano grueso (gabro, gabro olivinífero, troctolita y anortosita), con diferenciados félsicos, como diorita y plagiogranito (trondhjemitita), originados por cristalización en el tope de la cámara magmática.
- Cumulados gabroides-ultramáficos (gabro, gabro olivinífero, troctolita, anortosita, piroxenita, peridotita, dunita y cromitita podiforme), con grado

variable de serpentinización, formados por cristalización fraccionada del magma basáltico primario.

- Manto residual, conformado por harzburgita-dunita, con grado variable de serpentinización, en contacto de falla con los cumulados.
- Manto primario, conformado por peridotita de composición promedio lherzolita, con diferente mineralogía de acuerdo a la profundidad.



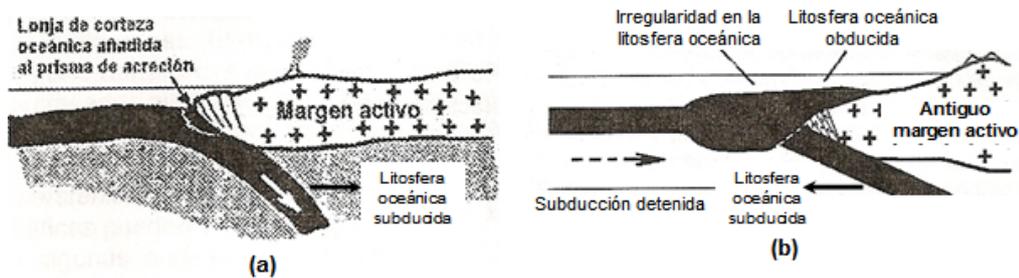
*Fig. 1. Secuencia idealizada de las asociaciones ofiolíticas  
Tomado de: S. Grande (2000a)*

Las zonas de subducción son el único marco tectónico apropiado para el emplazamiento de ofiolitas, mediante los siguientes mecanismos posibles (ver Fig. 2) (Grande, 2000a):

- **Acreción:** Se produce por el desmembramiento o desdoblamiento de la litosfera oceánica durante el proceso de subducción, cuyos numerosos fragmentos son incorporados en los prismas de acreción del complejo de

subducción. Los cuerpos emplazados por este mecanismo se caracterizan por presentar un espesor reducido que no muestran la secuencia completa de asociación ofiolítica.

- **Obducción:** Consiste en el sobrecojimiento de la litosfera oceánica por encima del complejo de subducción, debido a la presencia de zonas de engrosamiento anómalo (islas oceánicas y montes submarinos, escarpes de falla transformantes, dorsales oceánicas inactivas, etc.) en la placa que está siendo subducida, lo cual desactiva temporalmente el proceso de subducción. Mediante este mecanismo es posible emplazar cuerpos de gran espesor y extensión areal que muestran la secuencia completa de asociación ofiolítica.

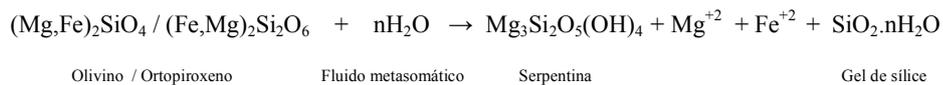


**Fig. 2. Mecanismos de emplazamiento de ofiolitas**  
**(a) Acreción, (b) Obducción**  
**Tomado de: S. Grande (2000a)**

La génesis de depósitos lateríticos de níquel se encuentra conformada por tres fases fundamentales, las cuales se describen a continuación (Bellizzia, 1967; Lavié, 1967; Ortiz, 2004; Grande, 2000b):

- (a) Alteración gradual y progresiva de la roca debido a la circulación de soluciones hidrotermales a través de la corteza oceánica fracturada, lo cual produce la hidratación de los minerales primarios magnesianos (olivino y ortopiroxeno). Estos silicatos anhidros son reemplazados por filosilicatos del grupo de la

serpentina, siendo liberados en soluciones iónicas los componentes solubles que quedan en exceso, tales como sílice, magnesio y hierro, originándose el aumento de la concentración *in situ* de aquellos relativamente insolubles, como níquel, manganeso y cobalto. El contenido primario de níquel en la roca fresca se encuentra alrededor de 0.25%, pudiendo alcanzar hasta un 0.40%.



- (b) Exposición del cuerpo rocoso a la intemperie como consecuencia del emplazamiento tectónico, lo cual produce la lixiviación de los constituyentes solubles, por efecto de la percolación de agua meteórica. Las soluciones de hierro se oxidan inmediatamente y precipitan a niveles superficiales como oxihidróxidos de hierro (limonita-hematita), formándose una laterita ferruginosa.



- (c) El aumento de la porosidad y permeabilidad en la masa de roca, permite la lixiviación de los constituyentes relativamente insolubles. Las soluciones de manganeso y cobalto se oxidan en esta etapa, y precipitan como oxihidróxidos de manganeso con variables cantidades de óxidos de cobalto; mientras que las soluciones de níquel migran más abajo y precipitan junto con las de sílice y magnesio, originándose una mezcla de silicatos hidratados de níquel-magnesio (garnierita), lo cual constituye la mena niquelífera. Las soluciones residuales de magnesio pueden precipitar a niveles profundos como carbonato de magnesio (magnesita), debido a la reacción del agua ácida (enriquecida en CO<sub>2</sub>) con dicho elemento; de la misma manera, es posible la formación de carbonato de hierro (siderita), a partir de soluciones residuales de hierro ferroso (Fe<sup>+2</sup>). El magnesio también puede oxidarse a niveles profundos y precipitar como

oxihidróxidos de magnesio (brucita-periclasa). Por su parte, el gel de sílice residual precipita como ópalo-calcedonia. El contenido de níquel en la roca alterada puede alcanzar hasta un 5%, lo cual representa hasta 20 veces su concentración inicial.

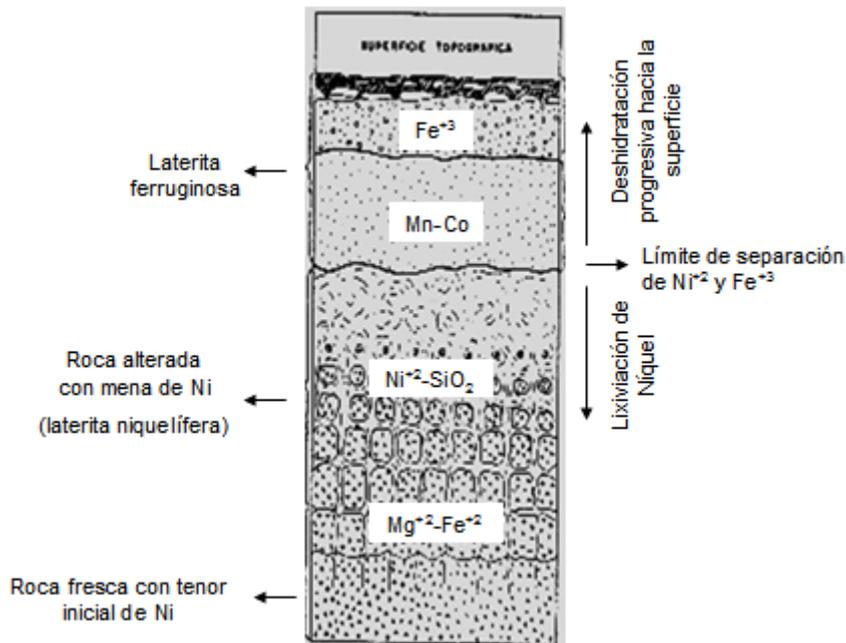
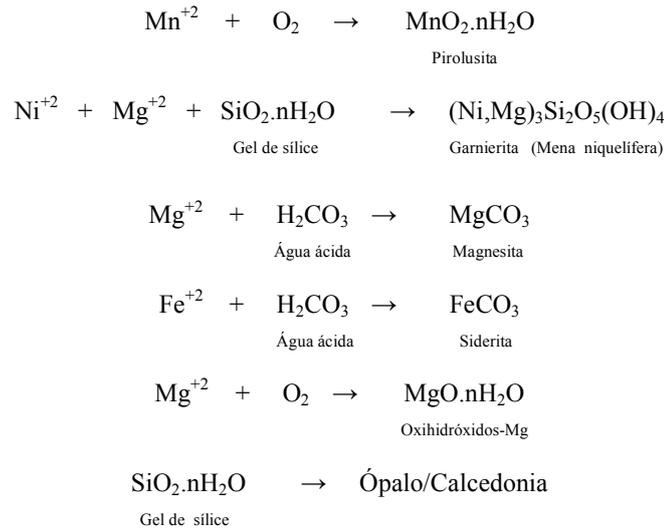


Fig. 3. Corte vertical mostrando los horizontes que se desarrollan sobre un cuerpo ofiolítico  
Modificado de: Lavié (1967)

Para que un depósito laterítico de níquel sea originado son requeridas las siguientes condiciones (Bellizzia, 1967; Lavié, 1967):

- (a) Ubicación de la masa rocosa en una zona climática con régimen de estaciones, lluviosa y seca, alternantes y fuertemente contrastantes; con precipitación anual mayor a 1.000 mm y evaporación anual mayor a 1500 mm, lo cual produzca marcadas fluctuaciones en el nivel freático, favoreciendo la lixiviación durante el período lluvioso y la saturación de las soluciones durante el período de sequía; temperatura media anual superior a 20°C y humedad media anual mayor a 60%, lo cual permita la intensa meteorización de la roca.
- (b) Existencia de una topografía con pendiente moderada (meseta, planada, etc.), lo cual favorezca la percolación y acumulación de las soluciones, impidiendo la erosión mecánica.
- (c) Formación de suficiente porosidad y permeabilidad en el cuerpo rocoso, lo cual permita una adecuada circulación y almacenamiento de las soluciones mineralizadas.
- (d) Las aguas de infiltración deben estar acidificadas (enriquecidas con ácido carbónico), a fin de favorecer las reacciones de hidrólisis.
- (e) Tiempo geológico suficiente para que se lleve a cabo todo el proceso de acumulación niquelífera.

## 4. MARCO GEOLÓGICO

### 4.1. UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El yacimiento Loma de Hierro es el único depósito niquelífero de Venezuela explotado comercialmente, el cual se localiza en el centro-norte del país, formando parte del flanco norte de la Serranía del Interior, y abarcando la zona limítrofe de los estados Aragua y Miranda (*ver Fig. 4*). Se extiende en forma de faja, al sur de Las Tejerías, estado Miranda, por unos 21 km de largo y un ancho hasta de 5 km (*ver Fig. 5*), desde el oeste de Tiara, estado Aragua, hasta las proximidades de Táchata, estado Miranda. El principal acceso es a través de la nueva vía a Tiara, la cual se inicia en el Kilómetro 54 de la Autopista Regional del Centro, encontrándose el yacimiento a unos 23 km de distancia (MLdN, 2007).



*Fig. 4. Ubicación relativa del yacimiento Loma de Hierro  
Mapa disponible en: <http://ecosig.ivic.ve>*



*Fig. 5. Ubicación geográfica del yacimiento Loma de Hierro  
Fuente: MLdN (2007)*

El área de estudio, en la cual se lleva a cabo actualmente la explotación del níquel por la empresa Minera Loma de Níquel, se ubica en el Municipio Guaicaipuro del estado Miranda, entre las coordenadas UTM 703.500-707.000E y 1.123.000-1.125.000N, presentando una longitud de unos 4 km por 1 km de anchura máxima. Se encuentra dividida en tres sectores, de acuerdo a las coordenadas locales E-O (ver Fig. 6), con frentes de extracción mineral en terrazas con altura de unos cinco metros, identificados según su correspondiente cota en metros (MLdN, 2004):

- **Sector Uno:** Se ubica hacia el oeste, aproximadamente entre las coordenadas locales 4425-5500E, con una extensión de alrededor de 1 km<sup>2</sup>. Se caracteriza por presentar los frentes de extracción con mayores cotas (niveles del 1260 al 1345). En este sector, se obtienen los mayores tenores de níquel; los tenores de hierro y sílice, en general, son también elevados.

- **Sector Dos:** Se encuentra ubicado en la parte central, aproximadamente entre las coordenadas locales 5500-6850E, con una extensión de 1,25 km<sup>2</sup> aproximadamente. En este sector se presentan frentes de extracción con cotas intermedias (niveles del 1185 al 1330). Los tenores de níquel y hierro son muy variables; el contenido de sílice es frecuentemente bajo.
- **Sector Tres:** Se ubica hacia el este, aproximadamente entre las coordenadas locales 6850-8500E, con una extensión de alrededor de 1,75 km<sup>2</sup>. Se caracteriza por presentar los frentes de extracción con menores cotas (niveles del 1105 al 1250). Los tenores de níquel en general son moderados; los tenores de hierro y sílice se encuentran frecuentemente altos.

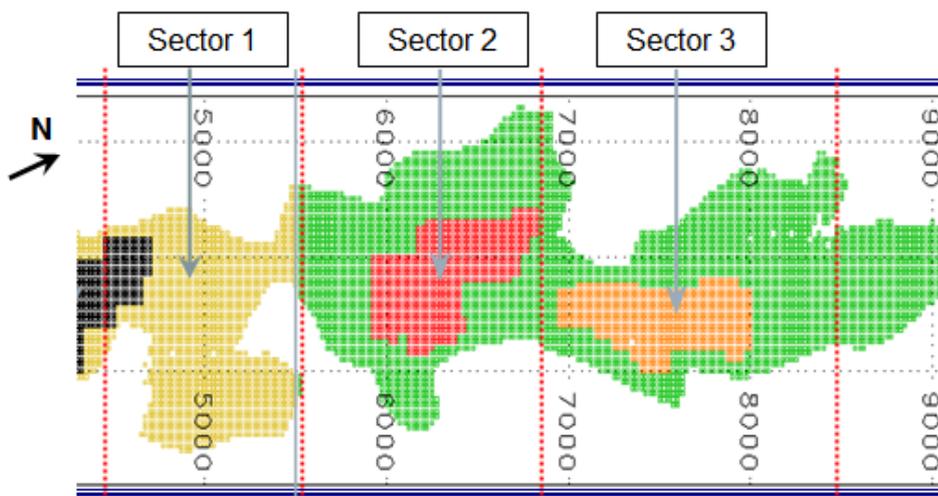


Fig. 6. Ubicación de los sectores que conforman la zona de explotación del yacimiento Tomado de: MLdN (2004)

#### 4.1.1. Características topográficas:

El relieve se presenta en forma de filas con orientación preferencial N65° E y cotas comúnmente entre los 1100-1300 metros, las cuales disminuyen localmente de oeste a este. Las líneas de cresta son agudas, y en ocasiones estrechas. Las laderas poseen pendientes moderadas a abruptas, y se encuentran recubiertas por un espeso

manto laterítico, con un delgado horizonte de vegetación herbácea de sabana abierta (entre los 1100 y 1200 metros) y de vegetación arbórea de bosque tropical húmedo (sobre los 1200 metros). La red de drenaje presenta un patrón reticulado, controlado por sistemas de diaclasas (MLdN, 2004).

#### **4.1.2. Características climáticas:**

El área posee un clima tropical húmedo, caracterizado por la alternancia de períodos, lluvioso y seco, marcadamente contrastantes, con precipitación media anual de 1800 mm, evaporación media anual de 2300 mm, temperatura media anual de 26 °C, y humedad relativa media anual de 75 % (MLdN, 2004).

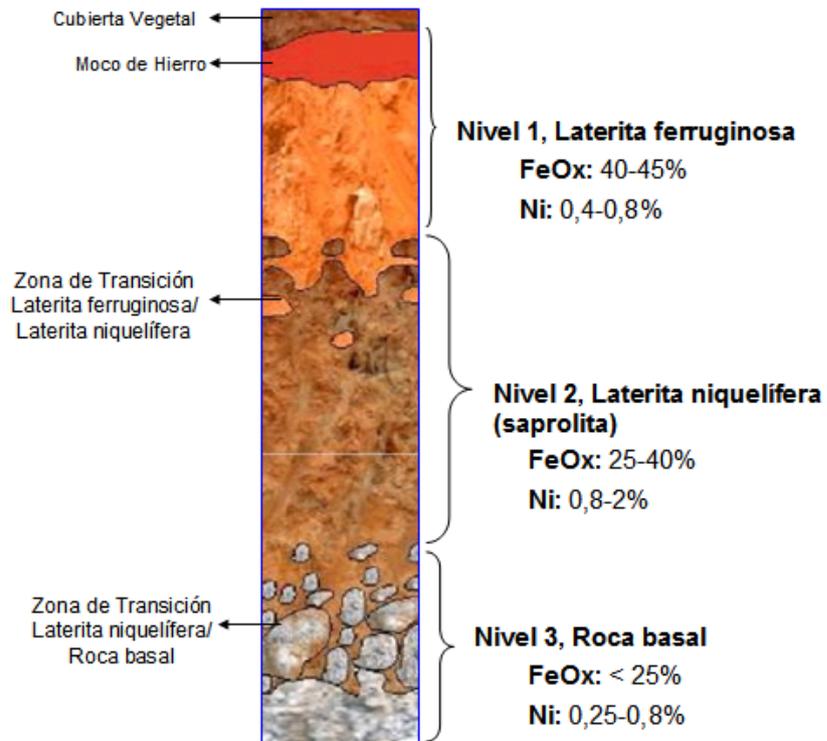
#### **4.1.3. Perfil de meteorización del yacimiento Loma de Hierro (Bellizzia, 1967; Lavié, 1967; MLdN, 2004):**

En el perfil de meteorización del yacimiento Loma de Hierro, se reconocen tres niveles fundamentales (*ver Fig. 7*), los cuales se diferencian por sus características físicas y químicas: laterita ferruginosa (nivel 1), laterita niquelífera (nivel 2) y roca basal (nivel 3).

- **Nivel 1, Laterita ferruginosa:** Constituye la cobertura de la zona de mena niquelífera. Es un suelo arcilloso, poroso, de color ocre rojizo a rojo oscuro, con peso específico relativamente elevado, bajo grado de humedad (15-20%), alto contenido de oxihidróxidos de hierro (40-45%) y bajo contenido de níquel (0,4-0,8%); los oxihidróxidos de hierro presentes son limonita-goethita, y hematita hacia las zonas más superficiales (moco de hierro). Se ubica una zona de transición entre la laterita ferruginosa y la laterita niquelífera, caracterizada por presentar un menor peso específico, elevada humedad (30-55%), un menor porcentaje de oxihidróxidos de hierro (35-40%) y un mayor contenido de

níquel (0,8-1%); dicha zona se encuentra enriquecida con oxihidróxidos de manganeso-cobalto.

- **Nivel 2, Laterita niquelífera (saprolita):** Es un manto arenoso con facies arcillosas, poroso, de color pardo amarillento, con bajo peso específico, grado medio de humedad (20-30%) y un contenido medio de oxihidróxidos de hierro (25-35%). Se caracteriza por el desarrollo de sistemas de grietas y fracturas, lo cual le otorga una alta permeabilidad, permitiendo la concentración de la mena niquelífera (garnierita) en forma de laminaciones y vetas, con un tenor de níquel elevado (1-2%). Se encuentra una zona de transición entre la laterita niquelífera y la roca basal, la cual presenta menores porcentajes de oxihidróxidos de hierro (20-25%) y de níquel (0,5-0,8%), así como un bajo grado de humedad (10-15%); dicha zona se encuentra conformada por abundantes nódulos de roca no digerida (boulders).
- **Nivel 3, Roca basal:** Este nivel infrayace a la zona de mena niquelífera. Presenta un peso específico elevado, baja porosidad y muy bajo grado de humedad (inferior al 10%), estando conformado por una masa de roca ultramáfica, fracturada, color verdoso a negro, la cual presenta bajo contenido de oxihidróxidos de hierro (menos del 20%) y porcentajes muy bajos de níquel (0,25-0,5%).



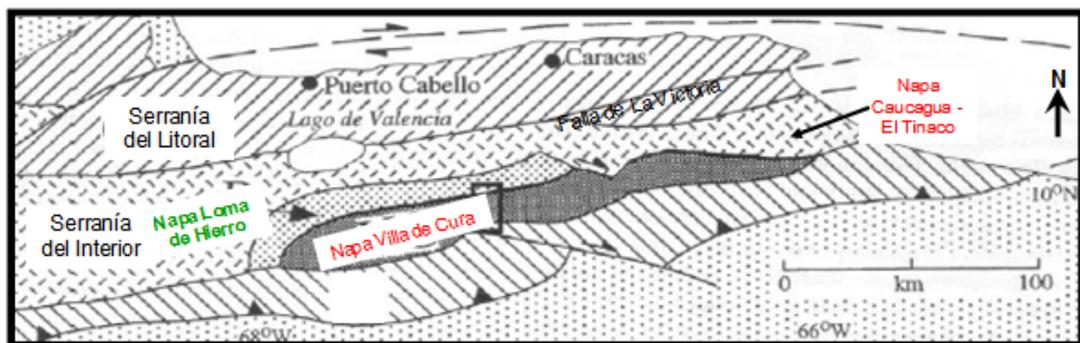
*Fig. 7. Corte vertical mostrando los niveles del yacimiento Loma de Hierro  
Modificado de: MLdN (2007)*

#### 4.2. GEOLOGÍA REGIONAL

Al centro-norte de Venezuela se encuentra el macizo central de la Cordillera del Caribe, el cual se divide en dos franjas con rumbo aproximado este-oeste, y separadas por la falla de La Victoria; la Serranía del Litoral en su mitad septentrional, y la Serranía del Interior en la meridional. Estas serranías se subdividen en varias fajas, formadas en espacios y tiempos distintos, separadas por fallas de carácter regional (Urbani, 2005).

La Serranía del Interior se subdivide en tres napa tectónicas; Caucagua-El Tinaco, Loma de Hierro y Villa de Cura, de norte a sur. La Formación Tiara y el Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro, conforman un cuerpo ofiolítico que pertenece a la Napa Loma de Hierro, la cual se encuentra en contactos estructurales bajo la Napa Caucagua-El Tinaco y sobre la Napa Villa de Cura (*ver Fig. 8*) (Urbani, 2005).

El cuerpo ofiolítico se ubica estratigráficamente sobre la Formación Tucutunemo (rocas metamórficas) de la Napa Caucagua-El Tinaco, mientras que la Formación Paracotos de la Napa Loma de Hierro, constituye la cobertura sedimentaria del mismo (Beck, 1980).



**Fig. 8. Napas tectónicas de la Serranía del Interior**  
**Fuente: Urbani (2005)**

El modelo tectónico de Dewey y Bird (1971), y todos los modelos más recientes propuestos para explicar el origen y la evolución de la parte norte de Suramérica, sugieren la existencia de un episodio de *rifting* en el Jurásico, entre Norteamérica y Suramérica, responsable de la apertura del mar Caribe, con el cual se inicia la formación de las rocas de la Cordillera del Caribe. La mayoría de los modelos proponen que el desarrollo de los cinturones montañosos caribeños, se produce después de ocurrir una colisión entre placas tectónicas, posterior al episodio de *rifting* propuesto, como es la subducción entre la placa Caribe y la placa Suramericana, iniciada en el Eoceno, la cual origina el emplazamiento tectónico de la litosfera oceánica caribeña mediante el mecanismo de acreción, a lo largo del norte de Suramérica. Por su parte, Talukdar *et al.* (1981) y Navarro (1983), sugieren que probablemente algunos de esos cinturones se derivan de un episodio orogénico Paleozoico, anterior a dicho *rifting*. Las ofiolitas caribeñas se caracterizan por formar cuerpos metamorfizados e intensamente deformados, de tipo alpino, que no muestran la secuencia completa de asociación ofiolítica (Grande, 2000a).

#### **4.2.1. Formación Tiara (Albiense-Cenomaniense?):**

Esta formación se extiende por unos 60 km en una franja discontinua, desde la zona central del estado Aragua hasta el sector occidental del estado Miranda, pasando por el sur de Ocumare del Tuy y Cúa, sur de Tácata, Altagracia de la Montaña, Agua Fría, Tiara, El Pao de Zárata y las cabeceras del valle del río Tucutunemo (Beck: 1985, 1986). La localidad tipo aflora al norte de Tiara, con un espesor superior a los 400 metros, según Shagam (1960) y Piburn (1968). De acuerdo con Urbani (2005), la Formación Tiara se encuentra incluida dentro de la unidad mayoritaria Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro.

Smith (1952), Shagam (1960), Piburn (1968), Graterol (1972) y Girard (1981) describen en esta formación, una interdigitación de basaltos, diabasas y microgabros, con muy bajo grado de metamorfismo. Los basaltos son densos, de color gris claro, verde y negro, sub-ofílicos, ocasionalmente almohadillados, algunas variedades son

porfídicas con fenocristales de plagioclasa, augita, magnetita titanífera, olivino y fragmentos líticos volcánicos, en una matriz muy fina de augita y plagioclasa, frecuentemente muy alterada a hornblenda, calcita, prehnita, pumpellita, epidoto y clorita. Las diabasas y microgabros se presentan en forma de diques intrusivos, con láminas tabulares de augita, a veces alterada a hornblenda y clorita, en relación ofítica y sub-ofítica con granos tabulares de plagioclasa. Junto a estas litologías, se indica una sección superior de metatobas microcristalinas de color negro, constituidas por fragmentos de rocas volcánicas, plagioclasa, augita anfibolitizada, cuarzo y lentes diseminados de ftanita, y una sección inferior de metabrechas polimícticas. A partir de los estudios geoquímicos de Girard (1981), Girard *et al.* (1982) y Beccaluva *et al.* (1995) se indica una afinidad MORB para las rocas de esta formación.

De acuerdo con Bellizzia (1967), la Formación Tiara se encuentra intrusionada por una diorita hornbléndica-granito sódico, la cual no forma afloramientos prominentes, presentándose frecuentemente muy meteorizada.

Smith (1952) señala que la Formación Tiara se encuentra en contacto estratigráfico discordante bajo la Formación Guárico; Menéndez (1966) y Beck (1985, 1986) señalan un contacto de fallas y estratigráfico discordante bajo la Formación Paracotos. Shagam (1960) y Konigsmark (1965) señalan que la Formación Tiara se ubica en contacto estratigráfico discordante sobre la Formación Santa Isabel del Grupo Villa de Cura; Bellizzia (1967) indica un contacto del mismo tipo sobre la Formación Tucutunemo; Beck (1985, 1986) indica un contacto (al sur) de fallas y estratigráfico discordante, sobre la unidad Loma de Hierro.

Smith (1952) correlaciona esta unidad con la Formación La Luna, de occidente, y con la Formación San Antonio, de oriente. Según Beck (1985, 1986), la Formación Tiara se correlaciona con la Formación Las Hermanas de la Napa Villa de Cura.

#### **4.2.2. Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro (Cretácico?):**

Esta unidad se extiende por unos 21 km en forma de faja, con una anchura variable entre 1 a 5 km, desde unos 4 km al oeste de Tiara, estado Aragua, hasta las proximidades de Táchata, estado Miranda. La localidad tipo aflora en la fila Loma de Hierro, ubicada a unos 20 km al sur de Las Tejerías, con un espesor mínimo de 800 metros (Graterol, 1972). Urbani (2005) establece al Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro como una unidad mayoritaria, conformada por tres unidades menores: Formación Tiara, Gabro de Mésia y Ultramáficas de Loma de Níquel.

Graterol (1972) señala que esta unidad se encuentra constituida por una asociación de rocas ultramáficas y gabroides, comagmáticas, con muy bajo grado de metamorfismo, y afinidad MORB según los análisis geoquímicos de Beccaluva *et al.* (1995). Las ultramafitas son peridotitas de tipo alpino, en forma de *sill*, principalmente tipo harzburgitas, macizas, de grano grueso, color negro verdoso a verde claro, constituidas por olivino y ortopiroxeno (enstatita), con un grado variable de serpentización, que se hace más intenso hacia los márgenes del bloque. Las rocas gabroides se componen de troctolitas, gabros oliviníferos y gabros asociados a basaltos, cuya mineralogía está compuesta principalmente por clinopiroxeno (diópsido) y plagioclasa cálcica muy alterada, a veces con bandas irregulares de textura pegmatítica; hacia el margen norte se presentan en forma de diques intrusivos, y hacia el margen sur se encuentran en forma cumulativa, ocasionalmente con cierta foliación.

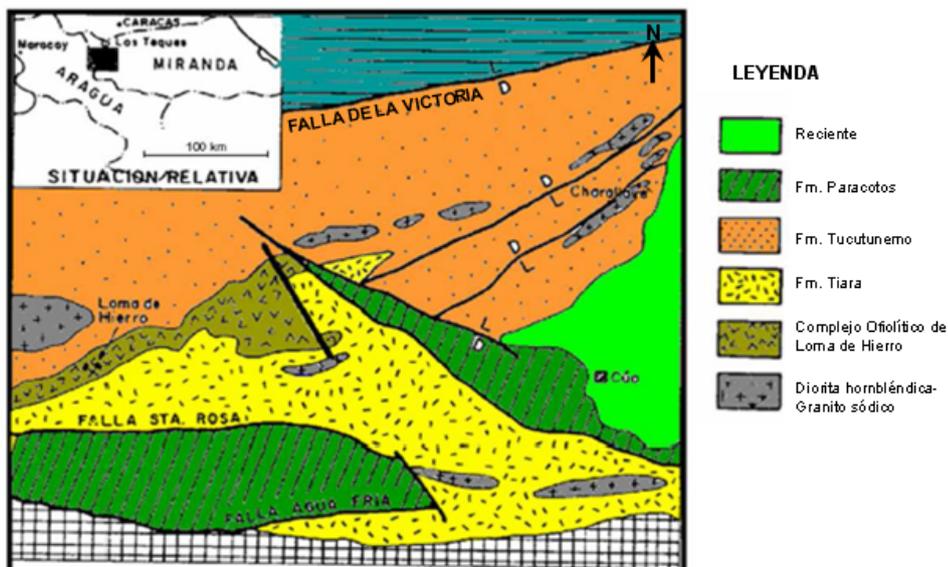
Según Beck (1985, 1986), al norte existe un contacto de fallas y estratigráfico discordante bajo las volcánicas de Tiara, y estratigráfico discordante bajo la Formación Paracotos; al sur se encuentra un contacto de fallas y estratigráfico discordante sobre la Formación Tucutunemo. Urbani (2005) agrega un contacto de fallas sobre el Esquisto de Tinapú.

Beck (1985, 1986) correlaciona esta unidad con las rocas ofiolíticas de Siquisique, estado Lara, y de la isla de Margarita.

#### 4.2.3. Geología Estructural Regional:

El área presenta un fallamiento derivado de la tectónica Caribe-Suramérica. El cuerpo ofiolítico se encuentra expuesto al sur de la falla de La Victoria, a lo largo y en las cercanías de las fallas de Santa Rosa y Agua Fría (ver Fig. 9), existiendo tres sistemas de fallas conjugadas con los siguientes rumbos (Bellizzia, 1967):

- N75° E: Fallas transcurrentes con componente oblicua, las cuales delimitan el cuerpo intrusivo.
- N75° W: Fallas normales reactivadas, asociadas con cuencas pull-apart, las cuales son ocupadas por grandes espesores de laterita coluvial.
- N45° W: Fallas de transferencia, a lo largo de las cuales ocurren frecuentemente cataclasitas talcificadas.



**Fig. 9. Área de afloramiento de la ofiolita Loma de Hierro**  
**Fuente: Simplificado de Bellizzia (1967)**  
**Disponible en: <http://www.pdvsa.com/lexico/>**

## **5. METODOLOGÍA**

La metodología se encuentra conformada por cinco etapas, las cuales se describen a continuación:

### **5.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA-CARTOGRÁFICA**

- Revisión de trabajos bibliográficos previos que contienen información geológica del área.
- Revisión del mapa topográfico de la zona de explotación del yacimiento, generado por Minera Loma de Níquel (2007), escala 1:5000, con la representación de los frentes de extracción mineral, para el reconocimiento de vías de acceso, afloramientos y características geomorfológicas-estructurales locales.
- Revisión de las fotografías aéreas de Cartografía Nacional, números 045 a 056, 108 a 115, misión 0303206, año 1995, escala 1:5000, para el reconocimiento de características geomorfológicas-estructurales del área.
- Revisión de mapas geológicos de la zona Loma de Hierro, realizados en años anteriores, para el reconocimiento de unidades litológicas y estructuras locales.

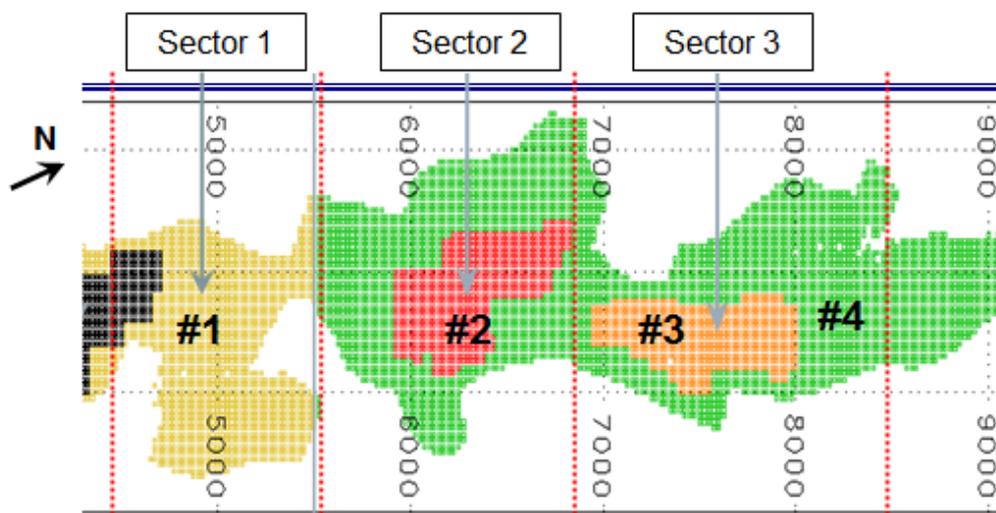
## 5.2. LEVANTAMIENTO DE CAMPO

Se realizó utilizando como base topográfica el mapa de explotación del yacimiento, Minera Loma de Níquel (2007), escala 1:5000. Los pasos para el levantamiento fueron los siguientes:

- Recorrido de superficie para el reconocimiento geológico de la zona, dividiéndose la misma en cuatro estaciones de trabajo constituidas por grupos de afloramientos de roca con características similares (ver *Tabla 1* y *Fig. 10*).

*Tabla 1. Ubicación de las estaciones de trabajo*

<i>Estación</i>	<i>Ubicación</i>
#1	<i>Oeste de la zona (sector uno)</i>
#2	<i>Parte central de la zona (sector dos)</i>
#3	<i>Este de la zona (área oeste del sector tres)</i>
#4	<i>Este de la zona (área este del sector tres)</i>

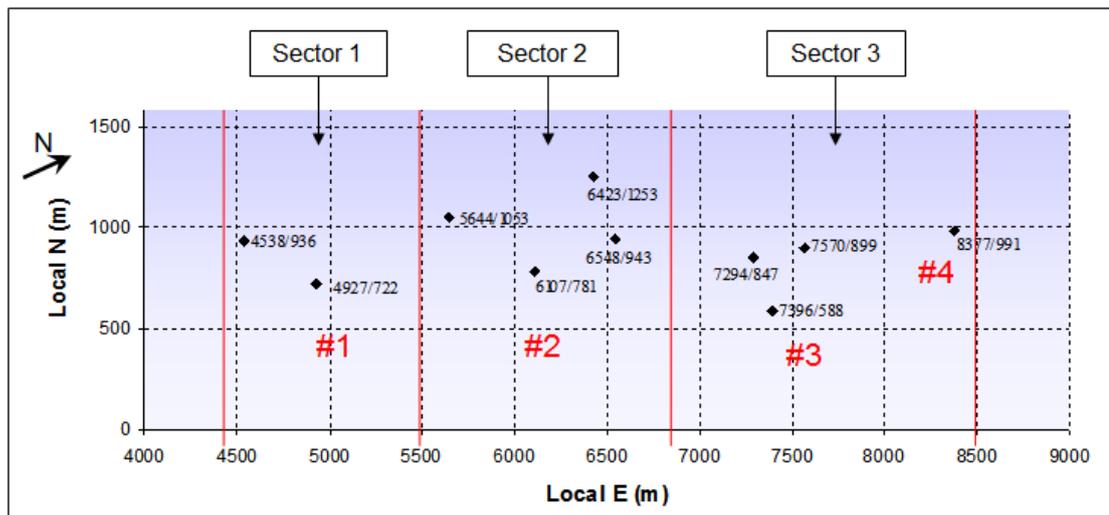


*Fig. 10. Mapa de ubicación de las estaciones de trabajo*  
Modificado de: MLdN (2004)

- Descripción geológica de las correspondientes estaciones, determinándose características litológicas, como color (fresco y meteorizado), granulometría y mineralogía (primaria y de alteración). Así mismo, fueron identificados y ubicados aquellos afloramientos de roca con los menores grados de alteración (litología menos serpentinizada y menos meteorizada), dentro de cada estación. Por otra parte, se cartografiaron las estructuras (fallas) y los cuerpos de sílice coloidal, de interés a la escala requerida.
- Recolección de muestras de roca en cada una de las estaciones, provenientes de los afloramientos menos alterados, previamente identificados, obteniéndose un total de diez muestras; en un área muy particular (estación #4), se obtuvo una muestra como canto rodado, ya que no fue encontrado un afloramiento prominente de dicha litología. La cantidad de muestras recolectadas estuvo limitada por la existencia de afloramientos de roca lo suficientemente fresca, dentro de la zona de explotación del yacimiento, considerando que las unidades de roca basal no se encuentran expuestas con suficiente frecuencia y continuidad, observándose mayormente los niveles de alteración litológica (laterita niquelífera y laterita ferruginosa); así mismo, se presentan ciertas áreas inaccesibles o cubiertas, tanto por vegetación como por pilas de sedimentos (*botaderos* y *backfills*). Las muestras se introdujeron en bolsas plásticas, correspondientemente rotuladas con las coordenadas locales E/N del punto de muestreo, y se trasladaron al sitio de análisis; dichas coordenadas fueron obtenidas mediante un levantamiento topográfico llevado a cabo por la Sección de Topografía de Minera Loma de Níquel, empleando una Estación Total (*ver Tabla 2 y Fig. 11*).

**Tabla 2. Ubicación de las muestras**

<i>Estación</i>	<i>Muestra</i>	<i>Coordenada UTM</i>	<i>Ubicación (sector, nivel)</i>
#1	4538/936	703.517E-1.123.308N	Sector 1, 1310-O
	4927/722	703.956E-1.123.286N	Sector 1, 1285-SE
#2	5644/1053	704.469E-1.123.885N	Sector 2, 1320-NO
	6107/781	705.004E-1.123.830N	Sector 2, 1205-O
	6423/1253	705.094E-1.124.393N	Sector 2, 1280-NE
	6548/943	705.336E-1.124.163N	Sector 2, 1250-E
#3	7294/847	706.052E-1.124.395N	Sector 3-O, 1200-O
	7396/588	706.313E-1.124.253N	Sector 3-O, 1115-S
	7570/899	706.282E-1.124.555N	Sector 3-O, 1165-N
#4	8377/991 (canto rodado)	706.972E- 1.124.984N	Sector 3-E, 1180-NE



**Fig. 11. Mapa de ubicación de las muestras**

### 5.3. ANÁLISIS DE MUESTRAS

- Descripción de las muestras de mano para complementar la descripción de campo, observándose con mayor detalle las características litológicas.
- Descripción petrográfica de las muestras por medio de secciones finas, previamente elaboradas en el Laboratorio de Preparación de Secciones Finas, Departamento de Geología - UCV, y analizadas en el Laboratorio de Petrografía ígneo-metamórfica, Departamento de Geología - UCV, por apreciación visual bajo microscopio petrográfico. Este análisis permitió obtener la composición mineralógica de las rocas (minerales primarios y de alteración, con sus respectivos porcentajes de abundancia y características), así como los rasgos texturales de las mismas. En primer lugar, se determinaron los porcentajes de olivino realizando un conteo modal, en un área de 15 x 20 mm de la lámina microscópica, para fines de la elaboración de un mapa de distribución local del contenido olivinífero en las rocas, y en base a estos valores se estimaron los porcentajes del resto de los componentes de la muestra, utilizando una *carta comparativa para estimación visual de porcentajes* (ver Fig. 12). Para la descripción de las muestras, se utilizó una *planilla para petrografía de rocas ígneas* (ver Fig. 13).

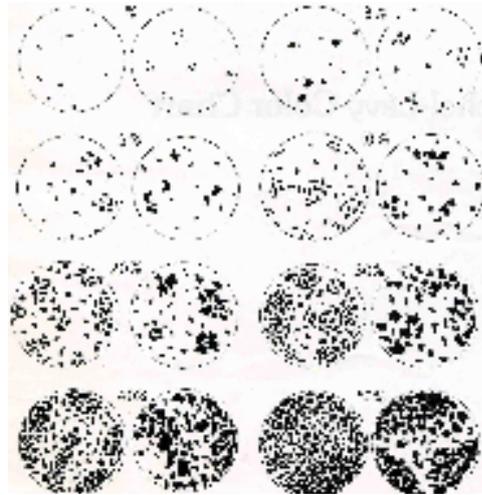


Fig. 12. Carta comparativa para estimación visual de porcentajes  
 Imagen disponible en: <http://gmg.unizar.es>

No. Muestra: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_ Petrografía por: Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**  
 Holocristalina

**GRANULARIDAD**  
 Fanerítica

**FÁBRICA**  
 Porfídociástica

**Texturas:**  
 Pseudomorfos  
 Reticulada  
 Cumulativa

TAMANOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz		
Fenocristales		

Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]: \_\_\_\_\_

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1-	
2-	
3-	
4-	
5-	

**CLASIFICACION GENERAL**  
 Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** \_\_\_\_\_

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** \_\_\_\_\_

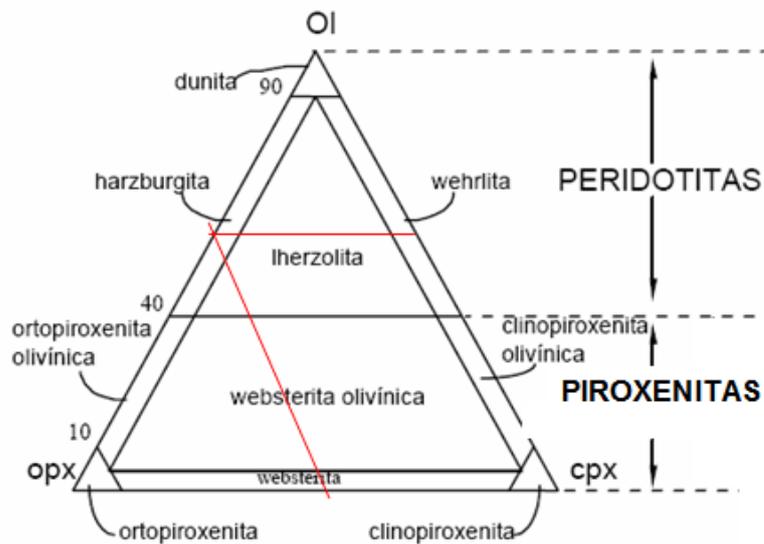
Fig. 13. Planilla para petrografía de rocas ígneas

- Análisis químico de las muestras, previamente trituradas y pulverizadas, por medio de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivo Acoplado (ICP-OES), realizada por el Laboratorio de Preparación - Minera Loma de Níquel (*ver Apéndice I*). La aplicación de esta técnica permitió determinar la composición química cuantitativa de las rocas, obteniéndose los porcentajes en peso de los componentes mayoritarios y minoritarios: SiO<sub>2</sub>, MgO, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, NiO y MnO, así como los porcentajes de LOI (*pérdida al fuego*).

#### **5.4. PROCESAMIENTO DE DATOS**

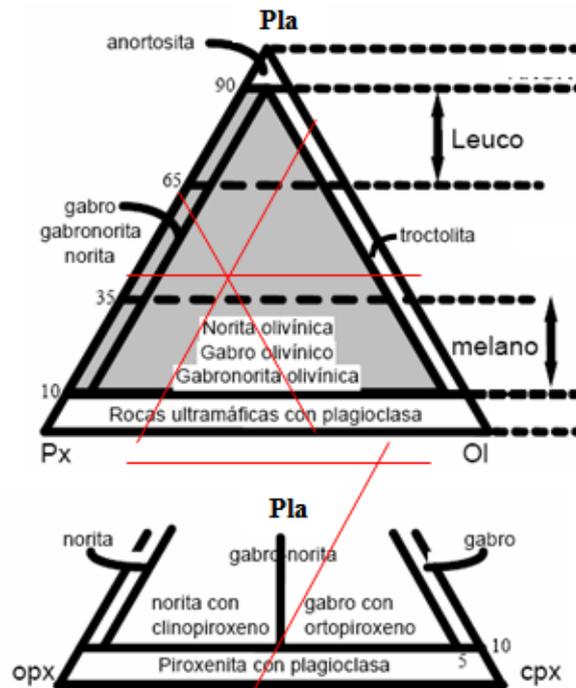
- Clasificación de las rocas, de acuerdo al sistema propuesto por la I.U.G.S. (1972), utilizando el diagrama para rocas ígneas ultramáficas (*ver Fig. 14*) y los diagramas para rocas ígneas gabroicas (*ver Fig. 15*), con lo cual se obtuvo los nombres protolíticos de las rocas. El procedimiento para la clasificación fue el siguiente:

*Clasificación para rocas ultramáficas:* por ejemplo, en una muestra se presenta la siguiente composición mineralógica (% de abundancia): 43% de olivino, 31% de ortopiroxeno, 19% de serpentina, 5% de opacos y 2% de Cr-espinela. Se define la sumatoria S, de los porcentajes de olivino y ortopiroxeno ( $S = 74\%$ ), para renormalizar al 100%, obteniéndose los siguientes valores: 58% de olivino ( $43\% \times 100/S$ ) y 42% de ortopiroxeno ( $31\% \times 100/S$ ). Finalmente, se ubican estos valores en el diagrama Ol-opx-cpx, de acuerdo a la escala porcentual, obteniéndose dos rectas paralelas a opx-cpx y Ol-cpx, respectivamente, cuya intersección indica el nombre protolítico de la roca (harzburgita). En este caso, como la roca contiene espinela accesorio ( $< 5\%$ ), se nombra harzburgita con espinela.



**Fig. 14. Diagrama de clasificación para rocas ultramáficas (I.U.G.S.)**  
**Ol: Olivino, opx: Ortopiroxeno, cpx: Clinopiroxeno**

*Clasificación para rocas gabroicas:* por ejemplo, en una muestra se presenta la siguiente composición mineralógica (% de abundancia): 36% de plagioclasa, 32% de ortopiroxeno, 18% de olivino, y 14% de minerales de alteración y accesorios. Se define la sumatoria S, de los porcentajes de plagioclasa, piroxeno y olivino ( $S = 86\%$ ), para renormalizar al 100%, obteniéndose los siguientes valores: 42% de plagioclasa ( $36\% \times 100/S$ ), 37% de piroxeno ( $32\% \times 100/S$ ) y 21% de olivino ( $18\% \times 100/S$ ). Posteriormente, se ubican estos valores en el diagrama Pla-Px-Ol, de acuerdo a la escala porcentual, obteniéndose tres rectas paralelas a las aristas, cuya intersección indica los posibles nombres protolíticos de la roca (gabro olivínico/norita olivínica/gabronorita olivínica). Finalmente, para discriminar entre las tres posibilidades, se utiliza el diagrama Pla-opx-cpx, siguiendo el mismo procedimiento, con lo cual se obtiene el nombre preciso de la roca (gabro olivínico).



**Fig. 15. Diagramas de clasificación para rocas gabroicas (I.U.G.S.)**  
**Pla: Plagioclasa, Px: Piroxeno, Ol: Olivino, opx: Ortopiroxeno, cpx: Clinopiroxeno**

- Integración y análisis de toda la información geológica disponible.
- Elaboración del mapa de distribución local del contenido de olivino en las rocas, a partir de los porcentajes modales de olivino previamente obtenidos. Se utilizó un algoritmo de *kriging* simple para generar una distribución regular mediante un criterio geostadístico. Tomando en cuenta las dimensiones del área de estudio y la variabilidad de los datos, se escogió un variograma lineal ajustado al rumbo preferencial de la unidad (N65°E), para la realización de tal proceso.
- Definición de las unidades ígneas y elaboración del mapa geológico de la zona, conteniendo la información litológica y estructural requerida.

### ***5.5. REDACCIÓN DEL INFORME FINAL Y PRESENTACIÓN DEL TRABAJO***

- Redacción del informe final.
- Presentación del Trabajo Especial de Grado ante el Jurado de la UCV.

## **6. RESULTADOS**

### **6.1. ESTACIÓN #1**

#### **6.1.1. Ubicación y Extensión:**

Es la estación ubicada más al oeste de la zona (sector uno), la cual se encuentra limitada al norte y oeste por el límite permisado de explotación, al norte y este por un horizonte de laterita ferruginosa de gran extensión, y al sur por el dique de contención del sector. En esta estación fueron recolectadas dos muestras representativas, las cuales se listan a continuación:

- Muestra 4538/936, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N73°W, ubicado en la parte oeste de la misma (cerca del límite de explotación), coordenada UTM 703.517E-1.123.308N, nivel de explotación 1310 (*ver Fig.11*).
- Muestra 4927/722, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N74°E, ubicado en la parte sureste de la misma, coordenada UTM 703.956E-1.123.286N, nivel de explotación 1285 (*ver Fig. 11*).

#### **6.1.2. Descripción de Campo:**

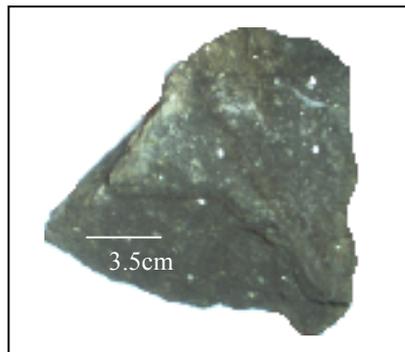
La roca posee una matriz olivínica, de color gris verdoso oscuro a negro, alterada a serpentina y en menor proporción a oxihidróxidos de hierro. Meteoriza pardo amarillento a pardo rojizo, pardo claro y blanco, y contiene porfidoclastos euhedrales de bastita (escamas de color bronce verdoso, con brillo submetálico a nacarado, tamaño de hasta unos 5 mm). Alteración mineralógica: serpentina fibro-lamelar en diferentes tonos verdosos, marrón amarillento, negro y blanco; oxihidróxidos de hierro; pátinas de serpentina color verde oscuro; pátinas azules de

un compuesto de cobalto; vetillas negras de minerales opacos; escamas de sílice incolora, blanca, amarillenta y rojiza; escamas y pátinas de garnierita color verde esmeralda claro; dendritas de pirolusita color negro azulado; y ocasionalmente magnesita. Presenta también vetillas de serpentina, de 1 mm hasta 8 mm de espesor, producto de la alteración. Las fracturas frecuentemente se encuentran rellenas de garnierita y sílice coloidal masiva a botroidal, incolora, blanca, amarillenta, ocre y marrón rojiza.

### ***6.1.3. Descripción Petrográfica:***

**Muestra 4538/936**

**Harzburgita con espinela**



***Fotografía 1. Muestra de mano 4538/936***

Se analizó la muestra 4538/936 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y en menor proporción ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, opacos y Cr-espinela, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclástica de tectonita, de grano medio a grueso, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 4538/936 (en orden de abundancia):***

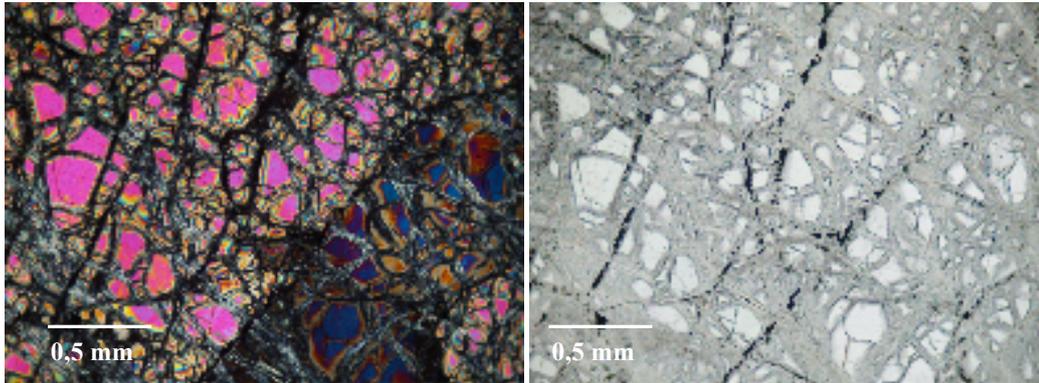
***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,15 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas ramificadas, rellenas de serpentina y minerales opacos.

***Ortopiroxeno (enstatita):*** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 1,1-5,5 mm. Con frecuencia, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

***Serpentina:*** Se encuentra como relleno de las numerosas microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibro-lamelar.

***Opacos:*** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

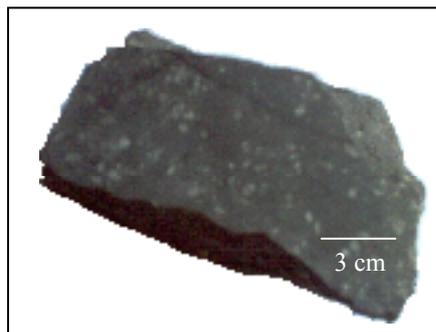
***Cr-espinela:*** Porfidoclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita.



*Fotomicrografía 1. Muestra 4538/936, Matriz olivínica en la harzburgita, 10X/0.25P, nicoles X y II*

**Muestra 4927/722**

**Harzburgita con espinela**



*Fotografía 2. Muestra de mano 4927/722*

Se analizó la muestra 4927/722 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y en menor proporción ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, opacos y Cr-espinela, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclástica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 4927/722 (en orden de abundancia):***

***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,15 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas ramificadas, rellenas de serpentina y minerales opacos.

***Ortopiroxeno (enstatita):*** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 0,8-3,5 mm. Frecuentemente, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

***Serpentina:*** Se encuentra como relleno de las numerosas microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibro-lamelar.

***Opacos:*** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

***Cr-espinela:*** Porfidoclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita.

## 6.2. ESTACIÓN #2

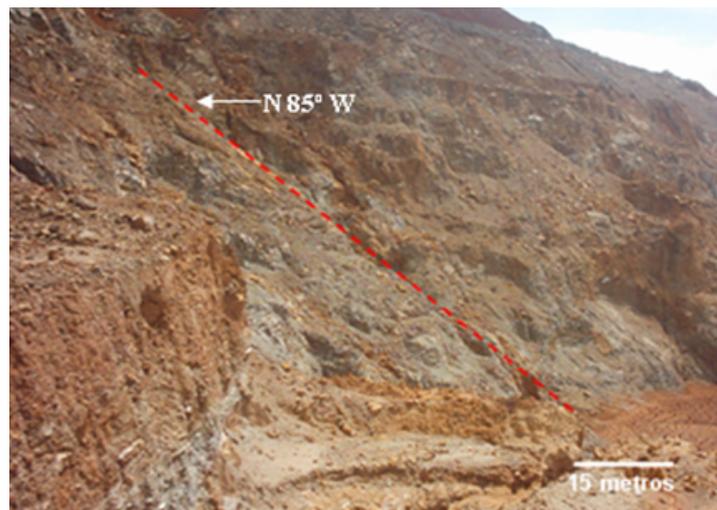
### 6.2.1. Ubicación y Extensión:

Se encuentra en la parte central de la zona (sector dos), limitada al norte, sur, este y oeste por áreas cubiertas, próximas a los límites permisados de explotación; al este se extiende hasta las cercanías del *mirador*. Se recolectaron cuatro muestras representativas en esta estación, las cuales se enumeran a continuación:

- Muestra 5644/1053, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N67°W, ubicado en la parte noroeste de la misma (al sur del *botadero* de “capa vegetal”), coordenada UTM 704.469E-1.123.885N, nivel de explotación 1320 (*ver Fig. 11*).
- Muestra 6107/781, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N86°E, ubicado hacia la parte oeste de la misma (al norte del dique de contención del sector), coordenada UTM 705.004E-1.123.830N, nivel de explotación 1205 (*ver Fig. 11*).
- Muestra 6423/1253, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N7°E, ubicado en la parte noreste de la misma (*Agua Amarilla*), coordenada UTM 705.094E-1.124.393N, nivel de explotación 1280 (*ver Fig. 11*).
- Muestra 6548/943, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N26°W, ubicado en la parte este de la misma (cerca del *botadero* principal del sector), coordenada UTM 705.336E-1.124.163N, nivel de explotación 1250 (*ver Fig. 11*).

### **6.2.2. Descripción de Campo:**

La roca posee una matriz olivínica, de color gris verdoso oscuro a negro, alterada a serpentina y en menor proporción a oxihidróxidos de hierro. Meteoriza pardo amarillento a pardo rojizo, pardo claro, verde claro, ocre, rosáceo, gris claro y blanco, y contiene porfidoclastos euhedrales de bastita (escamas de color bronce verdoso, con brillo submetálico a nacarado, tamaño de hasta unos 5 mm). Alteración mineralógica: serpentina fibro-lamelar en diferentes tonos verdosos, marrón amarillento a pardo oscuro, negro y blanco; oxihidróxidos de hierro; pátinas de serpentina color verde oscuro; pátinas azules de un compuesto de cobalto; vetillas negras de minerales opacos; escamas de sílice incolora, blanca, amarillenta, pardo clara y rojiza; escamas y pátinas de garnierita color verde esmeralda claro; y dendritas de pirolusita color negro azulado. Presenta también vetillas de serpentina, de 1 mm hasta 8 mm de espesor, producto de la alteración. Las fracturas en ciertas áreas se encuentran rellenas con una masa de sílice coloidal, incolora a amarillenta. Existe una falla local con orientación N85° W, a lo largo de la cual se presenta una abundante precipitación de sílice masiva a botroidal, incolora, blanca, amarillenta, verde pálida, ocre y púrpura.

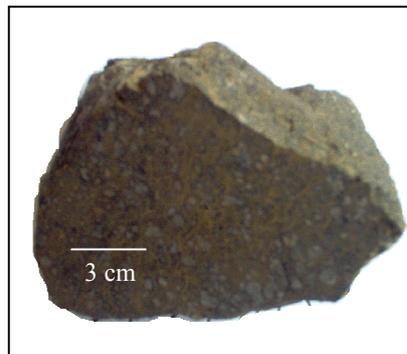


**Fotografía 3. Afloramientos en la Estación #2, indicándose el plano de falla**

### **6.2.3. Descripción Petrográfica:**

**Muestra 5644/1053**

**Harzburgita con espinela**



**Fotografía 4. Muestra de mano 5644/1053**

Se analizó la muestra 5644/1053 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y en menor proporción ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, oxihidróxidos de hierro, opacos y Cr-espinela, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclástica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

#### ***Minerales presentes en la muestra 5644/1053 (en orden de abundancia):***

***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,15 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas ramificadas, rellenas de serpentina y minerales opacos. En ocasiones, se encuentra alterado a oxihidróxidos de hierro.

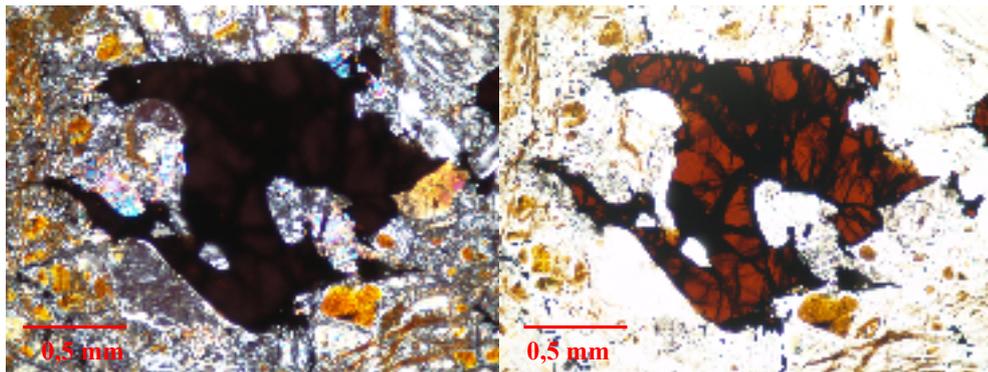
**Ortopiroxeno (*enstatita*):** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 0,8-3,8 mm. Con frecuencia, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (*bastita*).

**Serpentina:** Se encuentra como relleno de las numerosas microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibro-lamelar.

**Oxihidróxidos de hierro:** Se presentan como producto de alteración pseudomorfo del olivino.

**Opacos:** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

**Cr-espinela:** Porfidoclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita, en ocasiones con microfracturas rellenas de serpentina.



**Fotomicrografía 2. Muestra 5644/1053, Porfidoclasto de Cr-espinela en la harzburgita, 10X/0.25P, nicoles X y II**

**Muestra 6107/781**  
**Harzburgita con espinela**



***Fotografía 5. Muestra de mano 6107/781***

Se analizó la muestra 6107/781 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y una menor proporción de ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, oxihidróxidos de hierro, opacos y Cr-espinela, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclástica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 6107/781 (en orden de abundancia):***

***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,15 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas ramificadas, rellenas de serpentina y minerales opacos. En ocasiones, se encuentra alterado a oxihidróxidos de hierro.

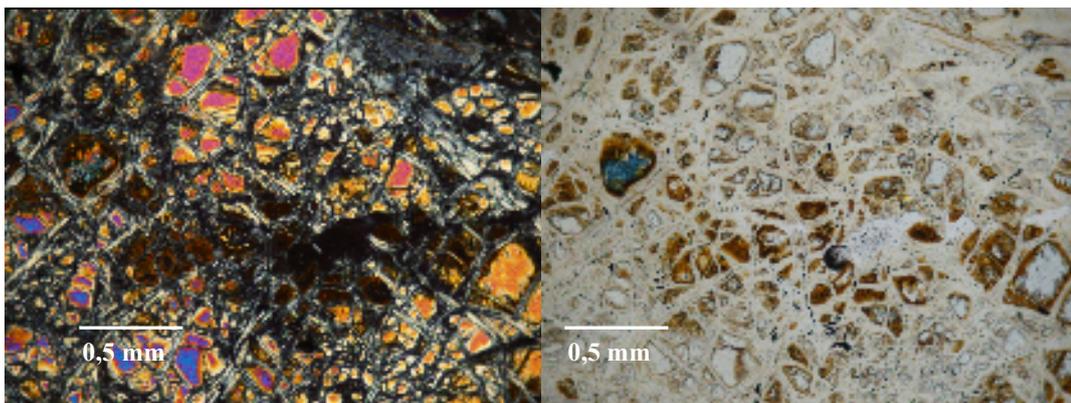
**Ortopiroxeno (*enstatita*):** Porfiroclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 1,1-4,2 mm. Frecuentemente, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

**Serpentina:** Se encuentra como relleno de las numerosas microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibro-lamelar.

**Oxihidróxidos de hierro:** Se presentan como producto de alteración pseudomorfo del olivino.

**Opacos:** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

**Cr-espinela:** Porfiroclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita.



**Fotomicrografía 3. Muestra 6107/781, Olivino alterado a oxihidróxidos de hierro en la harzburgita, 10X/0.25P, nícoles X y II**

**Muestra 6423/1253**  
**Harzburgita con espinela**



**Fotografía 6. Muestra de mano 6423/1253**

Se analizó la muestra 6423/1253 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y en menor proporción ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, opacos y Cr-espinela, como minerales de alteración y accesorios (ver *Tabla 3* y *Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclástica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (ver *Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 6423/1253 (en orden de abundancia):***

***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,2 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas irregulares, rellenas de serpentina y minerales opacos.

***Ortopiroxeno (enstatita):*** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 1,1-2,9 mm. Con frecuencia, los cristales

se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

***Serpentina:*** Se encuentra como relleno de las numerosas microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibro-lamelar.

***Opacos:*** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

***Cr-espinela:*** Porfidoclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita.

**Muestra 6548/943**

**Harzburgita con espinela**



***Fotografía 7. Muestra de mano 6548/943***

Se analizó la muestra 6548/943 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y en menor proporción ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, opacos y Cr-espinela, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclastica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 6548/943 (en orden de abundancia):***

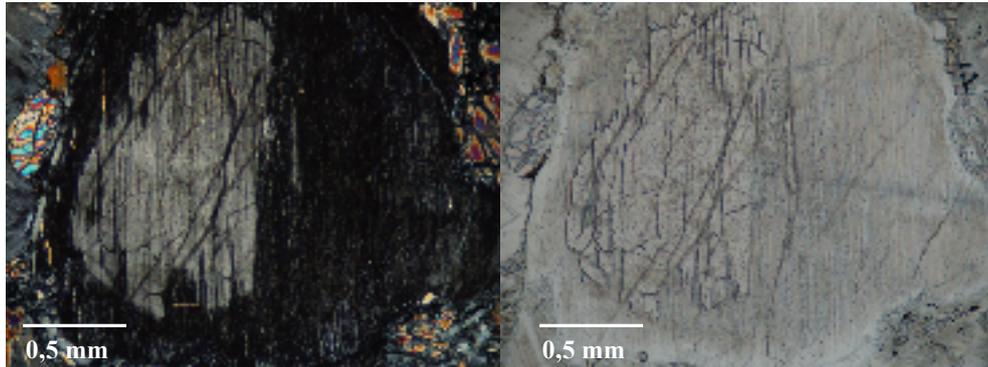
***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,2 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas irregulares, rellenas de serpentina y minerales opacos.

***Ortopiroxeno (enstatita):*** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 1,1-5 mm. Frecuentemente, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

***Serpentina:*** Se encuentra como relleno de las numerosas microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibro-lamelar.

***Opacos:*** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

***Cr-espinela:*** Porfidoclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita.



*Fotomicrografía 4. Muestra 6548/943, Porfidoclasto de ortopiroxeno-bastita en la harzburgita, 10X/0.25P, nicoles X y II*

### 6.3. ESTACIÓN #3

#### 6.3.1. Ubicación y Extensión:

Se ubica al este de la zona, en el área oeste del sector tres (al este del *mirador*), limitada al norte por la vía interna del sector, al sur por la vía mina-planta, al este por el *stock mineral* del sector, y al oeste por el *backfill* del sector. En esta estación fueron recolectadas tres muestras representativas, las cuales se listan a continuación:

- Muestra 7294/847, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N29°E, ubicado en la parte oeste de la misma (cerca del *backfill* del sector), coordenada UTM 706.052E-1.124.395N, nivel de explotación 1200 (*ver Fig.11*).
- Muestra 7396/588, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N14°W, ubicado en la parte sur de la misma (cerca de la vía mina-planta), coordenada UTM 706.313E-1.124.253N, nivel de explotación 1115 (*ver Fig.11*).
- Muestra 7570/899, correspondiente a un afloramiento de roca, con rumbo N62°E, ubicado en la parte norte de la misma (cerca de la vía interna-norte del

sector), coordenada UTM 706.282E-1.124.555N, nivel de explotación 1165 (ver Fig. 11).

### **6.3.2. Descripción de Campo:**

La litología posee una matriz olivínica, de color gris verdoso oscuro a negro, alterada a serpentina y en menor proporción a oxihidróxidos de hierro. Meteoriza pardo amarillento a pardo rojizo, pardo claro, amarillo claro, gris claro y blanco, y contiene porfidoclastos euhedrales de bastita (escamas de color bronce verdoso, con brillo submetálico a nacarado, tamaño de hasta unos 5 mm). Alteración mineralógica: serpentina fibro-lamelar en diferentes tonos verdosos, marrón amarillento, negro y blanco; oxihidróxidos de hierro; pátinas de serpentina color verde oscuro; pátinas azules de un compuesto de cobalto; vetillas negras de minerales opacos; escamas de sílice incolora, blanca y amarillenta; escamas y pátinas de garnierita color verde esmeralda claro; y dendritas de pirolusita color negro azulado. Presenta también vetillas de serpentina, de 1 mm hasta 8 mm de espesor, producto de la alteración. Existe una abundante precipitación de sílice coloidal masiva, incolora, amarillenta y marrón rojiza, a lo largo de las fracturas.

### **6.3.3. Descripción Petrográfica:**

**Muestra 7294/847**

**Harzburgita con espinela**



**Fotografía 8. Muestra de mano 7294/847**

Se analizó la muestra 7294/847 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y en menor proporción ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, oxihidróxidos de hierro, opacos y Cr-espínela, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclástica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 7294/847 (en orden de abundancia):***

***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,15 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas ramificadas, rellenas de serpentina y minerales opacos. En ocasiones, se encuentra alterado a oxihidróxidos de hierro.

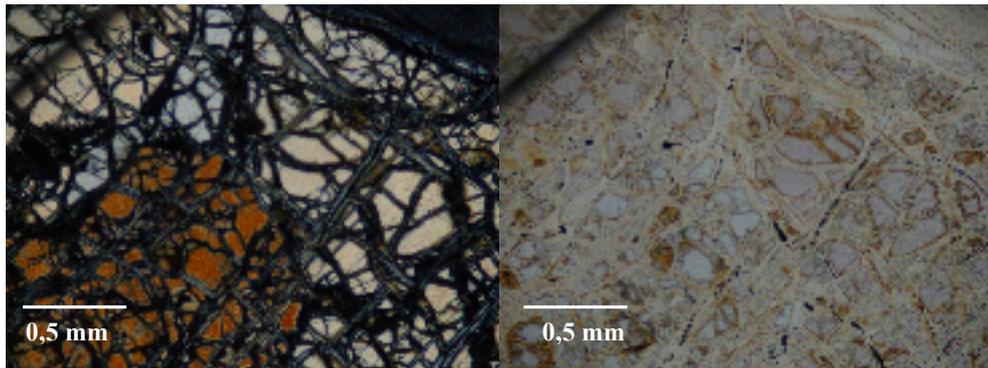
***Ortopiroxeno (enstatita):*** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 0,8-3,1 mm. Con frecuencia, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

***Serpentina:*** Se encuentra como relleno de las numerosas microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibro-lamelar.

***Oxihidróxidos de hierro:*** Se presentan como producto de alteración pseudomorfo del olivino.

**Opacos:** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

**Cr-espinela:** Porfiroclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita.



*Fotomicrografía 5. Muestra 7294/847, Matriz olivínica en la harzburgita, 10X/0.25P, nicoles X y II*

**Muestra 7396/588**  
**Harzburgita con espinela**



***Fotografía 9. Muestra de mano 7396/588***

Se analizó la muestra 7396/588 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son ortopiroxeno (enstatita), y una menor proporción de olivino, con serpentina, opacos, Cr-espinela y oxihidróxidos de hierro, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclastica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino, con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 7396/588 (en orden de abundancia):***

***Ortopiroxeno (enstatita):*** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 0,8-4,2 mm. Frecuentemente, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

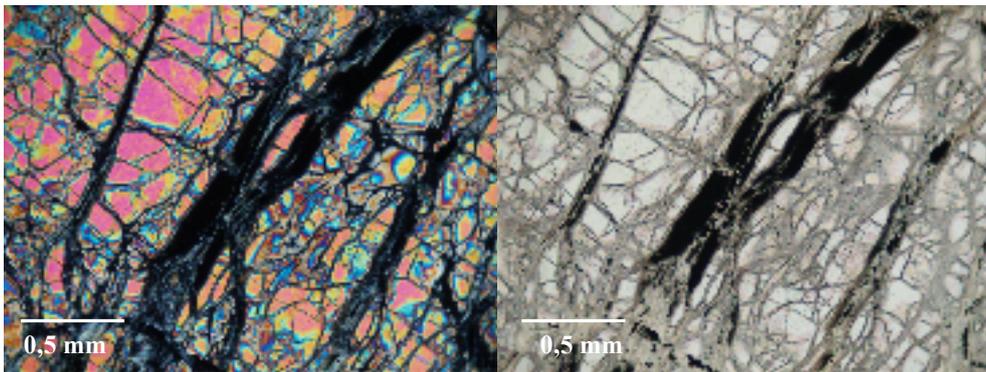
***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,2 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas irregulares, rellenas de serpentina y minerales opacos. Se encuentra levemente alterado a oxihidróxidos de hierro.

***Serpentina:*** Se encuentra como pseudomorfa del ortopiroxeno y como relleno de microfracturas en el olivino, en forma de vetillas. Presenta hábito fibro-lamelar.

***Opacos:*** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

***Cr-espinela:*** Porfiroclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita, en ocasiones con microfracturas rellenas de serpentina.

***Oxihidróxidos de hierro:*** Se presentan como un borde alrededor de algunos fragmentos de olivino.



***Fotomicrografía 6. Muestra 7396/588, Vetillas de opacos orientados con la serpentina en la harzburgita, 10X/0.25P, nicoles X y II***

***Muestra 7570/899***

***Harzburgita con espinela***



***Fotografía 10. Muestra de mano 7570/899***

Se analizó la muestra 7570/899 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son olivino, y en menor proporción ortopiroxeno (enstatita), con serpentina, opacos y Cr-espinela, como minerales de alteración y accesorios (*ver Tabla 3 y Tabla 4*).

Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, con fábrica porfidoclástica de tectonita, de grano medio, que consiste de una matriz de grano fino con textura reticulada (*ver Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 7570/899 (en orden de abundancia):***

***Olivino:*** Se observan fragmentos de esta especie mineral, con forma anhedral y contornos poligonales, en mosaico sintaxial, con un tamaño promedio de 0,2 mm, conformando la matriz. Posee gruesas microfracturas irregulares, rellenas de serpentina y minerales opacos.

***Ortopiroxeno (enstatita):*** Porfidoclastos subhedrales, tabulares, con finas microfracturas, y un tamaño variable entre 1-4,8 mm. Con frecuencia, los cristales se encuentran reemplazados, parcial y totalmente, por serpentina pseudomorfa (bastita).

***Serpentina:*** Se encuentra como relleno de microfracturas en el olivino, en forma de vetillas, y como pseudomorfa del ortopiroxeno. Presenta hábito fibrolamellar.

***Opacos:*** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, orientados junto con la serpentina. En ocasiones, presentan bordes de coloración parda rojiza.

***Cr-espinela:*** Porfidoclastos anhedrales, con hábito ameboidal, de color castaño rojizo con manchas negras de cromita, en ocasiones con microfracturas rellenas de serpentina.

## **6.4. ESTACIÓN #4**

### **6.4.1. Ubicación y Extensión:**

Es la estación ubicada más al este de la zona (área este del sector tres), en la cual no se presentan afloramientos prominentes de roca fresca, encontrándose un extenso coluvión laterítico, rodeado por áreas cubiertas de vegetación. La muestra representativa recolectada en esta estación (8377/991) corresponde a un canto rodado, localizado en la parte noreste de la misma, coordenada UTM 706.972E-1.124.984N, nivel de explotación 1180 (ver Fig. 11).

### **6.4.2. Descripción de Campo:**

La litología (canto rodado) presenta una textura granular cumulativa, conformada por granos de color blanco grisáceo (plagioclasa) y de color gris verdoso oscuro (clinopiroxeno-olivino), dispuestos en forma estratiforme, con colores de meteorización amarillento, ocre y rojizo, debido a oxihidróxidos de hierro.

### **6.4.3. Descripción Petrográfica:**

**Muestra 8377/991**

**Gabro olivínico cumulativo**

**(Crescumulado de piroxeno y olivino con heteroadcumulado de plagioclasa)**



**Fotografía 11. Muestra de mano 8377/991**

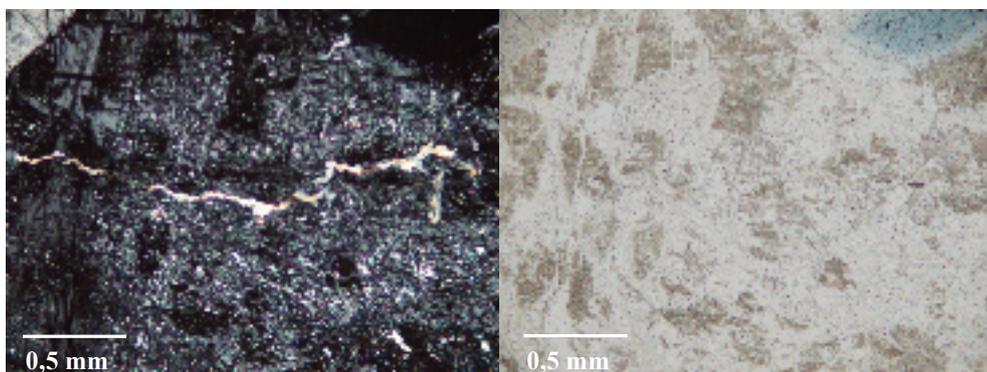
Se analizó la muestra 8377/991 bajo microscopio petrográfico, obteniéndose el siguiente resultado:

Los minerales primarios mayoritarios en la muestra son plagioclasa, clinopiroxeno (enstatita), y en menor proporción olivino, con sericita, serpentina, Mg-clorita, opacos y epidoto (clinozoisita), como minerales de alteración y accesorios (ver *Tabla 3* y *Tabla 4*).

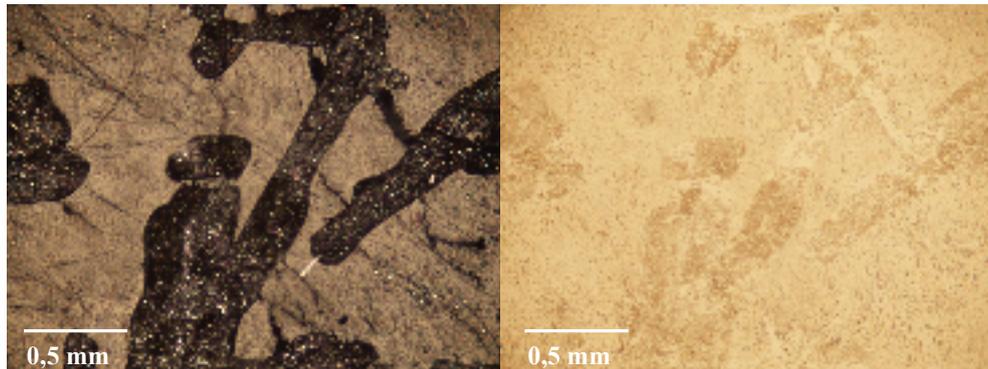
Respecto a los rasgos texturales, la roca es holocristalina, fanerítica, de grano medio a fino (tamaño variable entre 5 mm y 0,8 mm), con textura cumulativa (ver *Tabla 5*).

***Minerales presentes en la muestra 8377/991 (en orden de abundancia):***

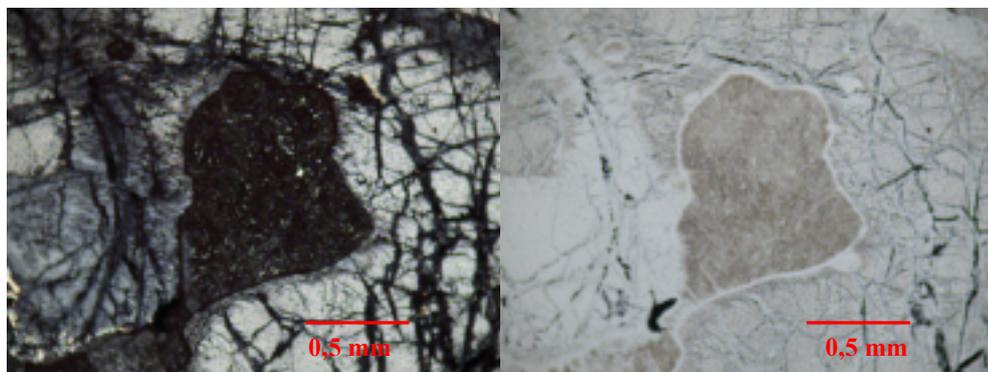
***Plagioclasa:*** Cristales con forma anhedral, saussuritizados, con aspecto turbio. Raramente se observan reliquias del maclado polisintético, pero debido al alto grado de alteración de los granos, no es posible determinar el ángulo de extinción. Se encuentra rodeada por cristales de clinopiroxeno y olivino, formando un *crecscumulado de piroxeno y olivino con heteroadcumulado de plagioclasa*, de acuerdo con la clasificación de *Wager y Brown (1960)*.



***Fotomicrografía 7. Muestra 8377/991, Plagioclasa saussuritizada en el gabro olivínico, 20X/0.40P, nicoles X y II***

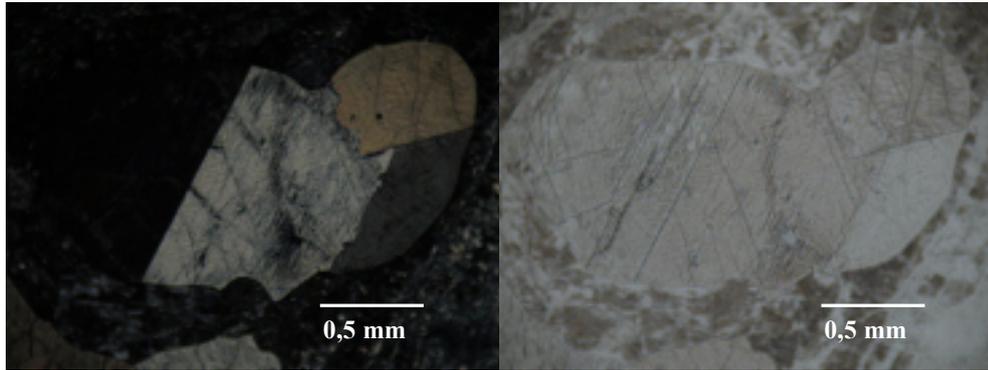


*Fotomicrografía 8. Muestra 8377/991, Plagioclasa anhedral rodeada por clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nicoles X y II*

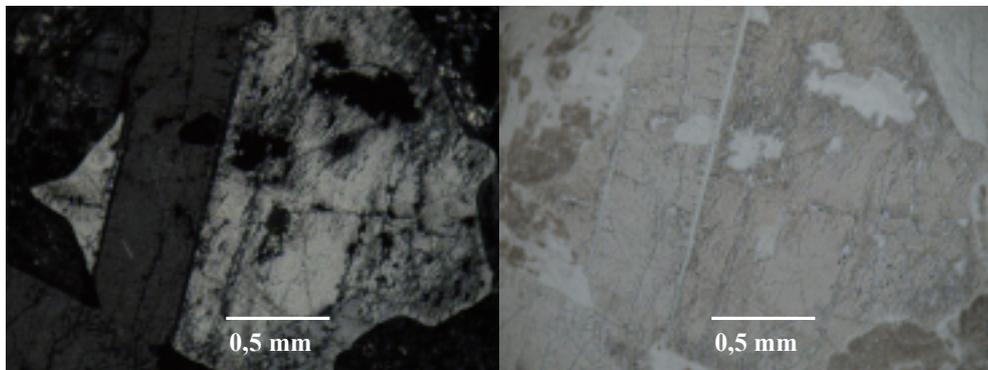


*Fotomicrografía 9. Muestra 8377/991, Plagioclasa anhedral rodeada por olivino en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nicoles X y II*

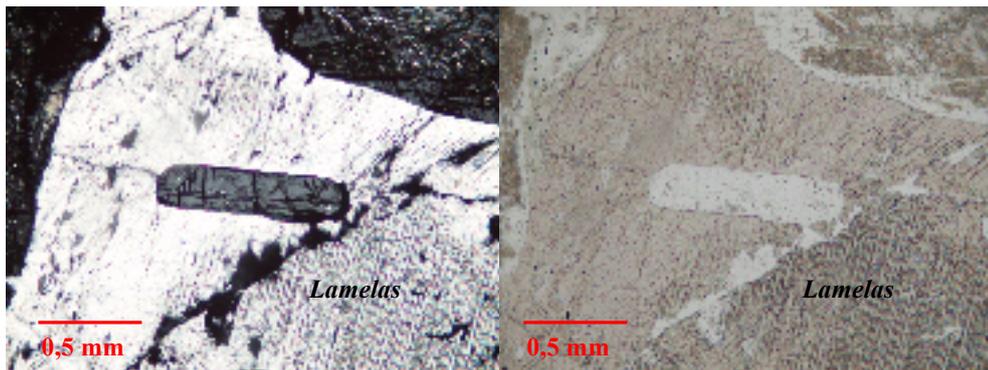
***Clinopiroxeno (diópsido):*** Cristales subhedrales con hábito tabular, en mosaico sintaxial (granos aparentemente separados en continuidad óptica). Presenta lamelas de exsolución de ortopiroxeno. En ocasiones, los granos presentan inclusiones de cristales euhedrales prismáticos de la misma especie mineral.



*Fotomicrografía 10. Muestra 8377/991, Cristal de clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II*

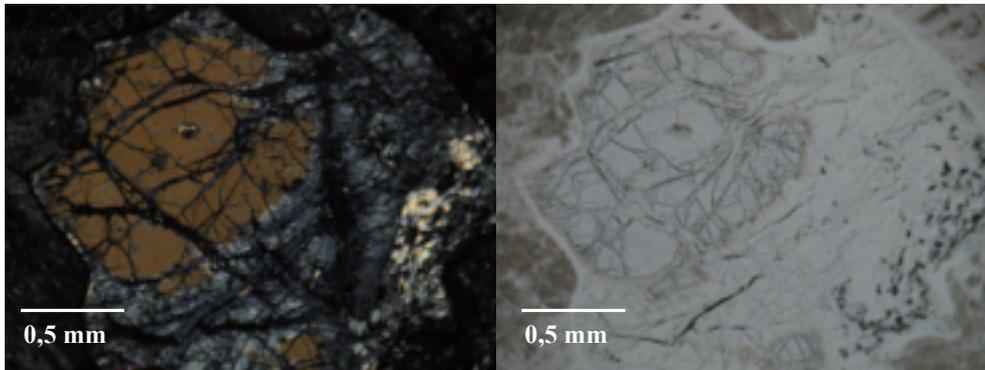


*Fotomicrografía 11. Muestra 8377/991, Cristal de clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II*



*Fotomicrografía 12. Muestra 8377/991, Lamelas de exsolución de ortopiroxeno en clinopiroxeno en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nícoles X y II*

**Olivino:** Cristales anhedrales, con gruesas microfracturas rellenas de serpentina, Mg-clorita y minerales opacos.



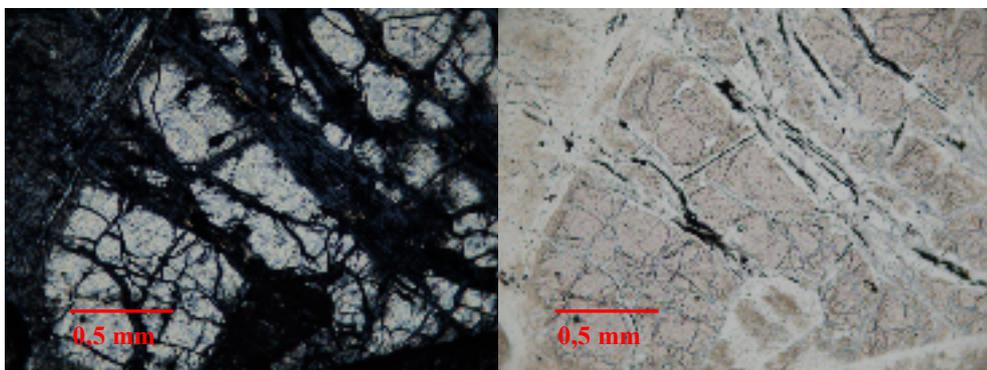
*Fotomicrografía 13. Muestra 8377/991, Cristal de olivino en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nicoles X y II*

**Sericita:** Mineral presente como producto de saussuritización de la plagioclasa.

**Serpentina:** Se encuentra como relleno de microfracturas en el olivino, en forma de vetillas.

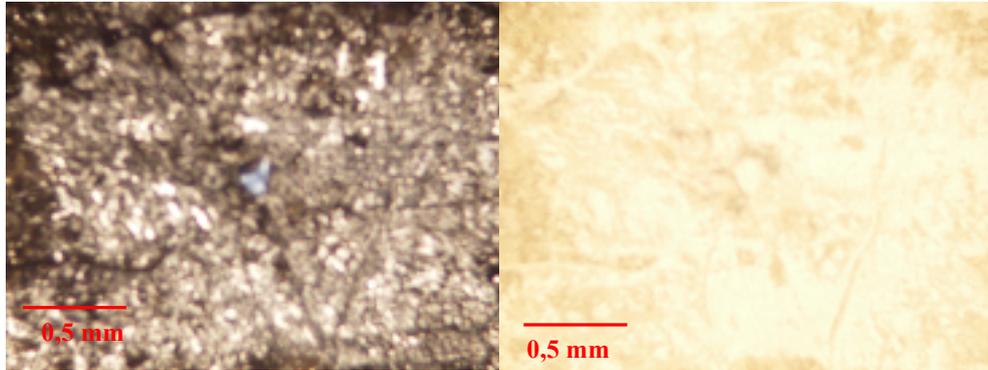
**Mg-Clorita:** Se encuentra como relleno de microfracturas en el olivino, en forma de vetillas.

**Opacos:** Se encuentran como relleno de microfracturas en el olivino, en forma de vetillas.



*Fotomicrografía 14. Muestra 8377/991, Vetillas de serpentina, clorita y opacos en el olivino en el gabro olivínico, 10X/0.25P, nicoles X y II*

***Epidoto (clinozoisita)***: Se observa un grano en forma de parche como producto de saussuritización de la plagioclasa.



***Fotomicrografía 15. Muestra 8377/991, Grano de epidoto en el gabro olivínico, como producto de saussuritización de la plagioclasa, 20X/0.40P, nicoles X y II***

Tabla 3. Composición mineralógica aproximada de las muestras

Muestra	% Primarios				% Alteración y accesorios				
	Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx	Otros
4538/936	40	15	0	0	39	5	1	0	0
4927/722	40	15	0	0	40	4	1	0	0
5644/1053	32	12	0	0	31	9	3	13	0
6107/781	41	19	0	0	26	3	1	10	0
6423/1253	49	15	0	0	30	5	1	0	0
6548/943	46	25	0	0	24	4	1	0	0
7294/847	34	15	0	0	32	5	1	13	0
7396/588	34	38	0	0	13	9	4	2	0
7570/899	43	31	0	0	19	5	2	0	0
8377/991	18	0	32	36	7	2	0	0	5

*Ol: Olivino, Opx: Ortopiroxeno, Cpx: Clinopiroxeno, Pla: Plagioclasa  
Srp: Serpentina, Op: Opacos, Cr-sp: Cr-espinela, FeOx: Oxihidróxidos de Hierro*

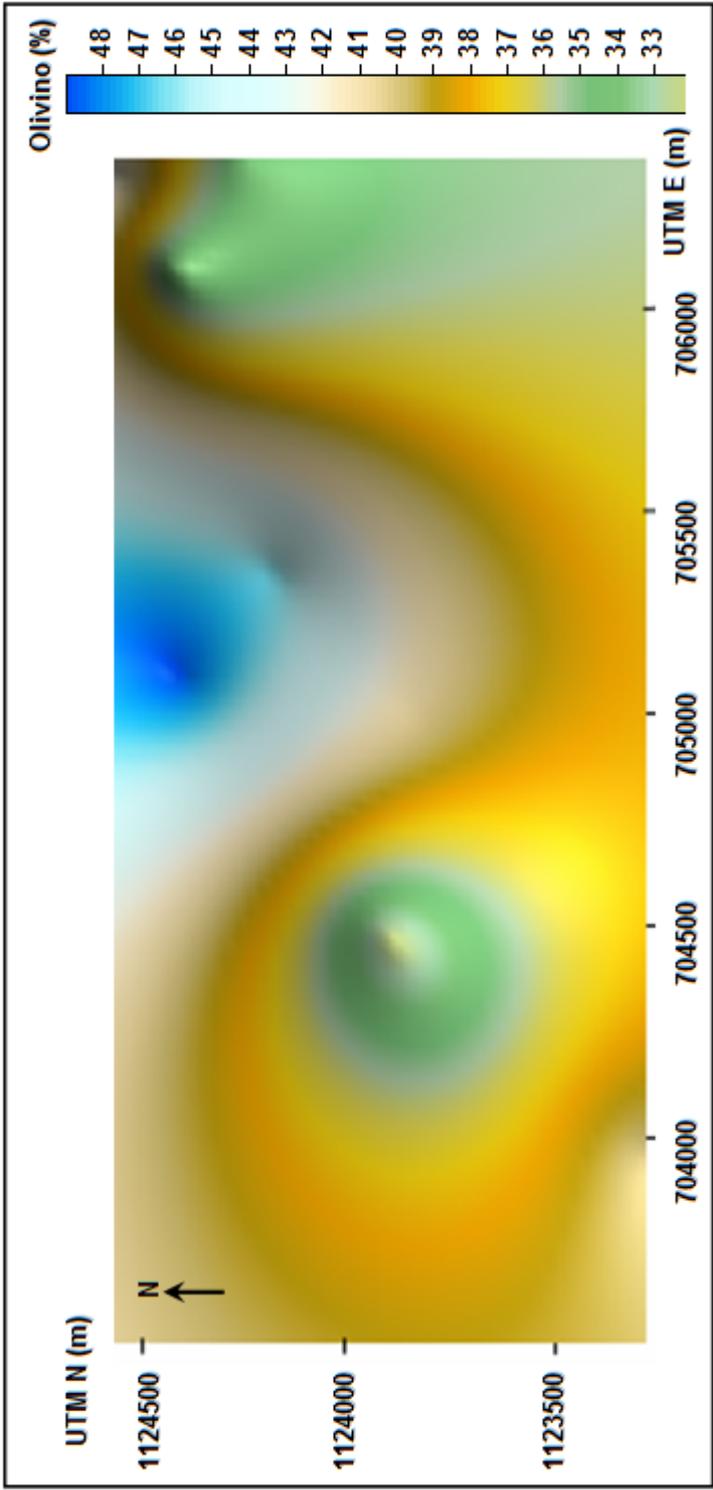
Tabla 4. Porcentajes modales de olivino en las muestras

Muestra	% modal
4538/936	39,6
4927/722	40,3
5644/1053	31,9
6107/781	40,7
6423/1253	49,1
6548/943	46,4
7294/847	33,6
7396/588	34,4
7570/899	43,2

Tabla 5. Rasgos texturales presentes en las muestras

Muestra	Cristalinidad	Granularidad	Fábrica	Tamaño de grano			Textura	
	Holocristalina	Fanerítica	Porfidoclastica de tectonita	Fino	Medio	Grueso	Ret	Cum
4538/936	x	x	x	x	x	x	x	
4927/722	x	x	x	x	x		x	
5644/1053	x	x	x	x	x		x	
6107/781	x	x	x	x	x		x	
6423/1253	x	x	x	x	x		x	
6548/943	x	x	x	x	x		x	
7294/847	x	x	x	x	x		x	
7396/588	x	x	x	x	x		x	
7570/899	x	x	x	x	x		x	
8377/991	x	x		x	x			x

*Ret: Reticulada, Cum: Cumulativa*



*Fig. 16. Mapa de distribución local del contenido de olivino en las rocas*

## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Todas las muestras estudiadas pertenecen a la unidad ígnea Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro. De las diez muestras, nueve (correspondientes a un 90%) son harzburgita con espinela, con grado variable de serpentización, la cual se encuentra aflorando en toda el área; la muestra restante (que corresponde a un 10%) es un gabro olivínico cumulativo (crescumulado de piroxeno y olivino con heteroadcumulado de plagioclasa), metasomatizado, encontrado como canto rodado hacia la parte este de la zona, el cual es proveniente del margen sur de la unidad (*ver Anexo 2*).

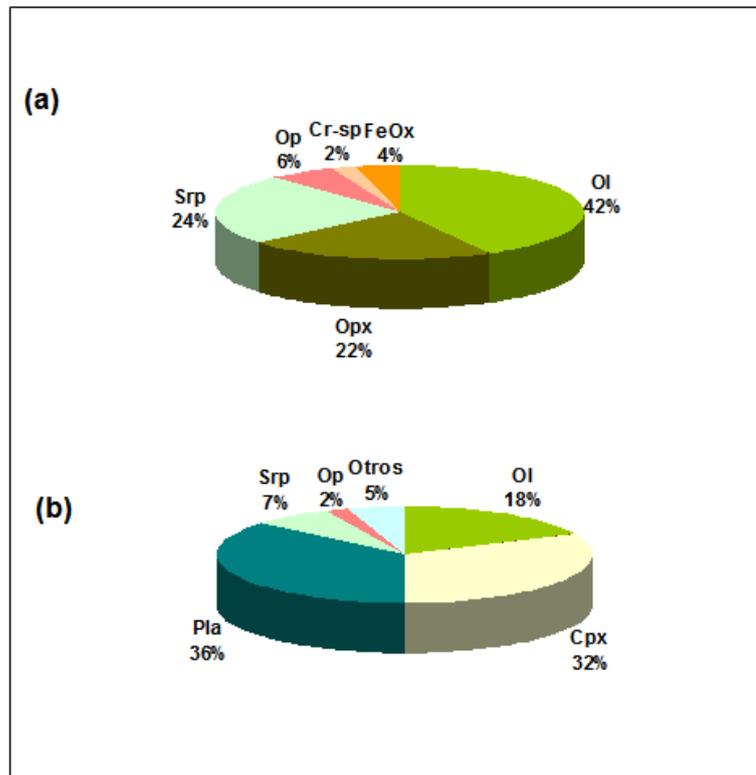
*Tabla 6. Tipos litológicos presentes*

<b>Muestra</b>	<b>Nombre protolítico</b>
<b>4538/936</b>	Harzburgita con espinela
<b>4927/722</b>	Harzburgita con espinela
<b>5644/1053</b>	Harzburgita con espinela
<b>6107/781</b>	Harzburgita con espinela
<b>6423/1253</b>	Harzburgita con espinela
<b>6548/943</b>	Harzburgita con espinela
<b>7294/847</b>	Harzburgita con espinela
<b>7396/588</b>	Harzburgita con espinela
<b>7570/899</b>	Harzburgita con espinela
<b>8377/991 (canto rodado)</b>	Gabro olivínico cumulativo (crescumulado de piroxeno y olivino con heteroadcumulado de plagioclasa)

**Tabla 7. Composición mineralógica promedio de la litología**

Litología	% Primarios				% Alteración y accesorios				
	Ol	Opx	Cpx	Pla	Srp	Op	Cr-sp	FeOx	Otros
Harzburgita con espinela	42	22	0	0	24	6	2	4	0
Gabro olivínico cumulativo	18	0	32	36	7	2	0	0	5

*Ol: Olivino, Opx: Ortopiroxeno, Cpx: Clinopiroxeno, Pla: Plagioclasa  
Srp: Serpentina, Op: Opacos, Cr-sp: Cr-espinela, FeOx: Oxihidróxidos de Hierro*



**Fig. 17. Gráfico de composición mineralógica promedio de la litología (a) Harzburgita con espinela, (b) Gabro olivínico cumulativo**

*Ol: Olivino, Opx: Ortopiroxeno, Cpx: Clinopiroxeno, Pla: Plagioclasa  
Srp: Serpentina, Op: Opacos, Cr-sp: Cr-espinela, FeOx: Oxihidróxidos de Hierro*

La harzburgita con espinela, compuesta por los minerales mantelares; olivino y ortopiroxeno (enstatita), y Cr-espinela accesoria, con fábrica porfidoclástica de tectonita, impartida por la presencia de porfidoclastos de ortopiroxeno-bastita en una matriz olivínica alterada, genéticamente forma parte del manto litosférico a una profundidad donde la espinela representa la fase mineralógica estable, entre unos 30 y 70 km de profundidad. A profundidades menores de 30 km, la espinela no cristaliza, y a mayores de 70 km se transforma en granate piropo, con el aumento de la presión (Wyllie, 1971). El olivino y el ortopiroxeno son estables en la corteza oceánica y en el manto superior hasta cierta profundidad; el olivino hasta unos 400-430 km, donde pasa a un polimorfo denominado wadsleyita, y el ortopiroxeno hasta unos 350-400 km, donde se convierte en granate piropo (Wyllie, 1971).

Una vez que se inicia la fusión parcial de la peridotita del manto superior, la roca se va empobreciendo en elementos incompatibles, como U, Th, K y Ti (*cationes que debido a su gran radio iónico y/o muy elevada o muy baja carga eléctrica, en comparación con el  $Mg^{+2}$  y  $Fe^{+2}$ , no son admitidos fácilmente en las estructuras cristalinas de los minerales mantelares*), generándose cierta cantidad de magma basáltico primario (MORB) y residuos cristalinos cada vez más refractarios; los procesos de fusión parcial continúan hasta que los residuos cristalinos (no refractarios) son consumidos (Ehlers y Blatt, 1982). Los primeros minerales en ser fundidos son aquellos enriquecidos en componentes basálticos (fundamentalmente aluminio), como la espinela, por lo tanto, la fusión ocasiona una disminución general del contenido de espinela y un incremento de cromo en la espinela hacia las rocas más residuales (Qi *et al.*, 1995; Hellebrand *et al.*, 2001; Aldanmaz *et al.*, 2005). De modo que esta harzburgita, pudo haber sido formada por recristalización debido a procesos de fusión parcial en el manto superior, dentro del campo de estabilidad de la espinela.

El gabro olivínico cumulativo, compuesto por los silicatos anhidros; plagioclasa cálcica, clinopiroxeno (diópsido) y olivino, dispuestos en forma estratiforme, fue originado por la cristalización fraccionada (asentamiento gravitacional) de un magma basáltico primario (MORB) durante la etapa inicial de segregación magmática, lo cual produjo la precipitación de minerales de alta densidad (ricos en  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  y  $Ca^{+2}$ ) en el fondo de la cámara magmática, ubicada entre unos 6-7 km de profundidad (Turner y Verhoogen, 1978; Grande, 2000a).

Los silicatos primarios en ambas litologías se encuentran reemplazados, en proporciones variables, por silicatos secundarios hidratados, tales como serpentina (fundamentalmente en el olivino y ortopiroxeno de la harzburgita), clorita (en el olivino del gabro), sericita y epidoto (en la plagioclasa del gabro), originados por un proceso de metasomatismo hidrotermal, sufrido en la roca ya consolidada durante su emplazamiento original, presentándose reliquias de los minerales pre-existentes (Turner y Verhoogen, 1978; Shagam, 1960).

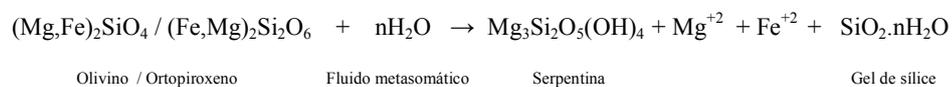
El metasomatismo hidrotermal es un metamorfismo regional de bajo grado que ocurre en márgenes tectónicos divergentes (centros de expansión oceánica), donde se infiltran enormes cantidades de agua marina (solución químicamente muy activa) a través de la corteza oceánica fracturada, en condiciones de gradientes geotérmicos muy elevados debido a la intensa actividad magmática submarina, lo cual permite la activación hidrotermal de los fluidos. Este proceso afecta a toda la corteza oceánica y manto subyacente asociado al centro de expansión, produciéndose cambios mineralógicos en los silicatos primarios, debido a la introducción de agua en la roca, lo cual genera rocas ígneas metasomatizadas que contienen una notable proporción de minerales hidratados (Grande, 2000a; Ehlers y Blatt, 1982).

La harzburgita sufre una alteración denominada serpentinización, la cual consiste en la formación de minerales del grupo de la serpentina, debido a la hidratación de los silicatos primarios magnesianos (olivino y ortopiroxeno).

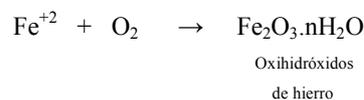
Las gruesas microfracturas presentes en el olivino, las cuales imparten a la peridotita una textura reticulada, permitieron la circulación de los fluidos metasomáticos (soluciones hidrotermales) en el interior de la roca, lo cual produjo la precipitación de nuevas fases minerales, especialmente serpentina, orientadas a lo largo de las fracturas, pudiéndose obtener una transición completa hasta rocas serpentínicas puras (Bellizzia, 1967; Turner y Verhoogen, 1978; Sawkins, 1984; Proenza *et al.*, 1997).

La existencia de serpentina pseudomorfa, derivada del ortopiroxeno y del olivino, es una clara evidencia de un lento proceso de alteración metasomática (serpentinización), donde se llevó a cabo el reemplazo *in situ* a expensas de los minerales primarios (Graterol, 1967).

El mineral primario (olivino/ortopiroxeno) queda reemplazado por el mismo volumen de serpentina, siendo liberado en soluciones iónicas el exceso de magnesio, hierro y sílice, de acuerdo a la siguiente ecuación general (Turner y Verhoogen, 1978; Lavié, 1967):



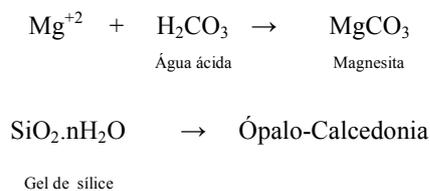
Los oxihidróxidos de hierro son minerales secundarios originados por meteorización, donde el mineral más susceptible a alterarse es el olivino (Teggin *et al.*, 1985). Cuando la peridotita es expuesta a la intemperie, se oxidan inmediatamente las soluciones de hierro formadas durante el metasomatismo (Lavié, 1967).



Las soluciones de magnesio y sílice precipitan junto con las soluciones de níquel que quedaron concentradas en la roca, lixiviadas al aumentar la porosidad y permeabilidad, formándose una mezcla de silicatos hidratados de níquel-magnesio (garnierita), lo cual constituye la mena níquelífera (Lavié, 1967).



Las soluciones residuales de magnesio pueden precipitar como carbonato de magnesio (magnesita), debido a la reacción del agua ácida (enriquecida en CO<sub>2</sub>) con dicho elemento (Grande, 2000b). Por su parte, el gel de sílice residual precipita como ópalo-calcedonia (Lavié, 1967).



Los opacos son fundamentalmente minerales primarios, productos iniciales y tardíos del proceso de segregación magmática, y su orientación en forma de vetillas se interpreta como producto de acumulación posterior durante la serpentinización, aunque también durante la serpentinización pueden generarse minerales opacos (Graterol, 1967; Winkler, 1974). La existencia de bordes translúcidos en los opacos, indica la presencia de cromita alterada (Panayiotou, 1978).

En el gabro, la plagioclasa cálcica (posiblemente labradorita) sufre una alteración denominada saussuritización, lo cual origina un agregado de grano fino de plagioclasa albitizada y sericita (debido a la adición de soluciones enriquecidas en Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>), junto con pequeñas cantidades de epidoto; el aspecto turbio observado en la plagioclasa se debe a esta alteración. El olivino además de serpentinización, sufre cloritización, debido a la adición de soluciones ricas en Al<sup>+3</sup>.

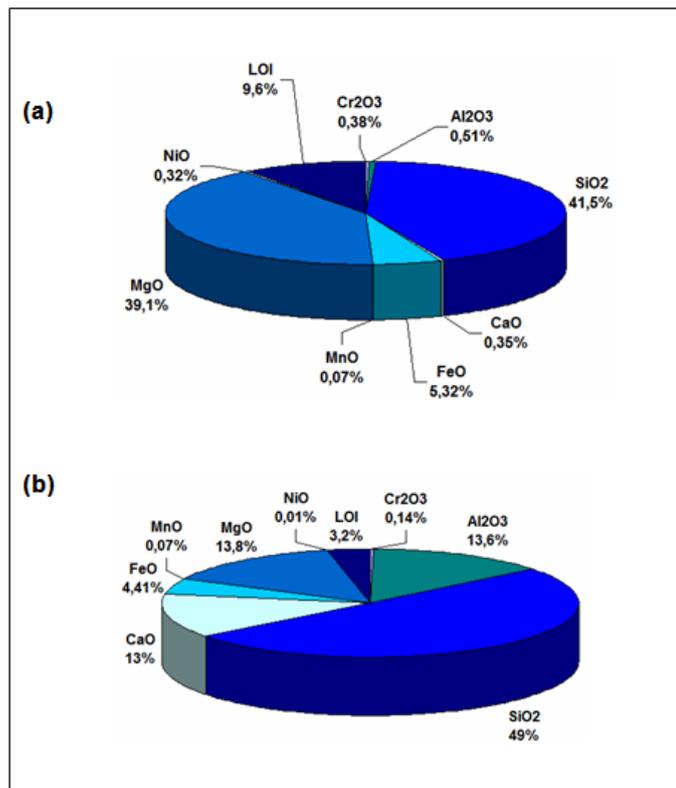
En el mapa de distribución local del contenido de olivino en las rocas (*ver Fig. 16*), se observa que los valores varían entre un 32% y un 49%, los cuales se asocian a un mismo tipo litológico (harzburgita), existiendo cierta homogeneidad en la zona. En la parte norte se localiza un área de máxima concentración olivínica.

La composición química de las rocas es un reflejo de su mineralogía. Los componentes químicos mayoritarios presentes en la harzburgita son SiO<sub>2</sub>, MgO y FeO, en orden general de abundancia; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, NiO y MnO, se encuentran como componentes químicos minoritarios. Por su parte, los químicos mayoritarios presentes en el gabro son los siguientes, en orden de abundancia: SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO y FeO, encontrándose Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO y NiO, como químicos minoritarios (*ver Apéndice 2*).

Se observa que el contenido de SiO<sub>2</sub> en la harzburgita es inferior al 45%, lo cual indica que contiene gran proporción de minerales subsaturados, en este caso, olivino magnesiano (forsterita-crisolita); mientras que, el contenido de SiO<sub>2</sub> en el gabro se ubica entre un 45-52%, lo cual indica que presenta gran proporción de minerales saturados, tales como plagioclasa y piroxeno (Grande, 2000a). El Mg es el componente fundamental de los silicatos máficos: olivino, piroxeno y serpentina, el cual se encuentra en mayor proporción en la peridotita, acompañado por cantidades menores de Fe. En el gabro, los contenidos de Al y Ca son mucho mayores, por ser una roca rica en plagioclasa cálcica y clinopiroxeno. El Cr se encuentra en mayor proporción en la peridotita, formando parte de los óxidos complejos cromita y Cr-espinela; en el gabro forma parte de la cromita. Los valores de LOI (*pérdida al fuego*) se deben al contenido total de agua en la roca (agua de hidratación de los minerales de alteración, como serpentina, oxihidróxidos de hierro, sericita, clorita y epidoto, y agua proveniente de la humedad natural en la roca); los cuales son más elevados en la peridotita, ya que presenta un importante grado de serpentinización (*ver Tabla 8 y Fig. 18*).

**Tabla 8. Composición química promedio de la litología (% en peso)**

Litología	MgO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	FeO (%)	NiO (%)	LOI (%)
<b>Harzburgita con espinela</b>	39,1	0,51	41,5	0,35	0,38	0,07	5,32	0,32	9,6
<b>Gabro olivínico acumulativo</b>	13,8	13,6	49,0	13,0	0,14	0,07	4,41	0,01	3,2



**Fig. 18. Gráfico de composición química promedio de la litología (% en peso)**  
**(a) Harzburgita con espinela, (b) Gabro olivínico acumulativo**

## **8. SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1. SUMARIO**

- En la zona de explotación del yacimiento Loma de Hierro, han sido reconocidos dos tipos litológicos, pertenecientes a la unidad geológica Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro; harzburgita con espinela, con grado variable de serpentización, y gabro olivínico cumulativo (crescumulado de piroxeno y olivino con heteroadcumulado de plagioclasa), metasomatizado.
- La peridotita posee una fabrica porfidoclástica de tectonita, caracterizada por la presencia de porfidoclastos de ortopiroxeno-bastita, en una matriz olivínica alterada a serpentina y oxihidróxidos de hierro, con opacos y Cr-espinela como minerales accesorios, la cual pudo ser originada por procesos de fusión parcial en el manto superior, dentro del campo de estabilidad de la espinela.
- El gabro está compuesto por cristales de plagioclasa cálcica muy alterada, clinopiroxeno (diópsido) y olivino, de grano medio a fino, dispuestos en forma estratiforme, con sericita, serpentina, Mg-clorita, opacos y epidoto (clinozoisita), como minerales de alteración y accesorios, el cual fue originado por cristalización fraccionada de un magma basáltico primario.

## 8.2. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados anteriormente expuestos se derivan las siguientes conclusiones:

- Las litologías son típicas de una secuencia ofiolítica, pudiendo haber sido originadas en un centro de expansión oceánica, y posteriormente emplazadas en un complejo de subducción. La formación de esta ofiolita se ha asociado con el *rifting* ocurrido en el Jurásico, entre Norteamérica y Suramérica, responsable de la apertura del mar Caribe, y se ha propuesto que su emplazamiento es consecuencia de la subducción Caribe-Suramérica, iniciada en el Eoceno a lo largo del norte de Suramérica.
- Durante su emplazamiento original, estas rocas experimentaron un proceso de metasomatismo hidrotermal, el cual generó el reemplazo de la mineralogía pre-existente por minerales secundarios hidratados, debido a la introducción de soluciones acuosas de origen marino y/o metamórfico-metasomático.
- En la peridotita, la alteración metasomática consiste fundamentalmente en la serpentización de la roca, evidenciada por el fracturamiento interno y el pseudomorfismo a expensas de los minerales primarios.
- En el gabro cumulativo, la alteración metasomática comprende la saussuritización, serpentización y cloritización de la roca, lo cual originó la aparición de nuevas fases minerales, como plagioclasa albitizada, sericita, epidoto, serpentina y clorita.

- El emplazamiento tectónico permitió la exposición del cuerpo ofiolítico a la intemperie, y su consiguiente meteorización, evidenciada por la presencia de oxihidróxidos de hierro en las rocas, lo cual se asocia con el proceso de laterización que permitió el enriquecimiento niquelífero, debido al descenso de soluciones mineralizadas, formadas a partir del metasomatismo de los silicatos primarios ferro-magnesianos.

### **8.3. RECOMENDACIONES**

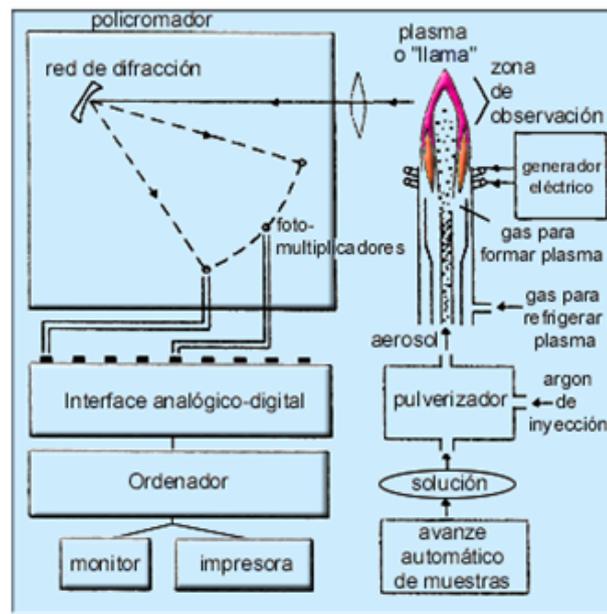
- Realizar un análisis por difracción de rayos-X (DRX), para determinar con precisión la composición y frecuencia de los minerales, tanto en las rocas como en la laterita niquelífera (saprolita).
- Realizar un estudio sobre las covariaciones espaciales existentes entre el contenido olivinífero de las rocas y los tenores de níquel presentados en la laterita niquelífera (saprolita), lo cual permita obtener una descripción más precisa de las diferentes áreas del yacimiento.

## 9. APÉNDICES

### Apéndice 1: Técnica de Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivo Acoplado (ICP-OES)

Consiste en una fuente de energía excitadora que se obtiene a través de la colisión de un flujo de gas plasmógeno (argón), a la presión atmosférica, con un campo de inducción magnético (campo de radiofrecuencia), lo que permite alcanzar temperaturas de unos 10000 K, debido a la ionización del gas. A esta temperatura, los elementos presentes en la muestra de análisis, emiten luz a longitudes de onda características, que son separadas por medio de una rejilla de difracción y capturadas por detectores sensibles a la luz, particulares para cada elemento.

La ICP-OES es una variante de las técnicas de análisis instrumental, cuyas ventajas principales radican en su alta precisión, exactitud y mejores límites de detección, obteniéndose de manera simultánea, el análisis de la mayoría de los elementos e isótopos presentes en el sistema periódico, en corto tiempo.



**Fig. 19. Diagrama de la técnica ICP-OES**  
Fuente: MLdN (2007)

*Apéndice 2: Composición química cuantitativa de las muestras analizadas (% en peso de los componentes mayoritarios y minoritarios)*

Muestra	MgO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	FeO (%)	NiO (%)	LOI (%)	Total (%)
4538/936 Harzburgita con espinela	38,5	0,58	41,7	0,26	0,38	0,07	5,19	0,48	11,7	98,9
4927/722 Harzburgita con espinela	37,8	0,61	42,0	0,23	0,34	0,07	5,18	0,51	11,9	98,6
5644/1053 Harzburgita con espinela	37,0	0,62	42,6	0,21	0,44	0,06	4,80	0,32	10,1	96,2
6107/781 Harzburgita con espinela	39,7	0,53	41,2	0,42	0,27	0,08	5,21	0,25	8,5	96,2
6423/1253 Harzburgita con espinela	39,9	0,49	41,1	0,29	0,36	0,08	5,23	0,25	8,7	96,4
6548/943 Harzburgita con espinela	40,2	0,42	40,9	0,47	0,35	0,08	5,40	0,23	8,1	96,2
7294/847 Harzburgita con espinela	37,4	0,62	42,3	0,28	0,31	0,07	5,10	0,40	11,6	98,1
7396/588 Harzburgita con espinela	40,4	0,41	40,8	0,49	0,53	0,08	5,82	0,19	7,6	96,3
7570/899 Harzburgita con espinela	40,7	0,32	40,8	0,48	0,42	0,08	5,99	0,21	7,8	96,8
8377/991 Gabro olivínico cumulativo	13,8	13,6	49,0	13,0	0,14	0,07	4,41	0,01	3,2	97,2

Nota: Los componentes trazas no se encuentran reportados en este análisis

## 10. GLOSARIO

**Anhedral (xenomórfico):** Cristal con caras mal definidas.

**Bastita:** Serpentina pseudomorfa procedente del ortopiroxeno enstatita, con brillo submetálico a nacarado.

**Clinopiroxeno, serie:** Serie isomorfa conformada por el diópsido  $(Ca,Mg)Si_2O_6$ , augita  $(Ca,Mg,Fe)Si_2O_6$  y hedenbergita  $(Ca,Fe)Si_2O_6$ , desde el extremo más magnesiano hasta el extremo más ferruginoso. Las especies son desde incoloras, blancas y verdes pálidas hasta verdes oscuras y negras, a medida que aumenta el contenido de hierro, transparentes a translúcidas, con fractura astillosa y brillo vítreo. Se altera comúnmente a clorita y anfíbol.

**Clorita:** Aluminosilicato hidratado ferro-magnesiano perteneciente al sistema cristalino monoclinico, con algunos polimorfos triclinicos, clase de los filosilicatos, de fórmula general  $(Al,Fe,Mg)_6(Si,Al,Fe)_4O_{10}(OH)_8$ , con hábito tabular o escamoso, exfoliación basal perfecta, deformación plástica, color verde en variadas tonalidades, transparente a translúcido, raya verde, brillo vítreo a perlado, y dureza relativa de 2-3. Se encuentra como producto de alteración en rocas máficas.

**Coluvión:** Material detrítico transportado por gravedad y depositado a corta distancia, transitoria o permanentemente, al pie de una vertiente. Dicho material es originado por meteorización y cizallamiento de un cuerpo rocoso cercano.

**Cromita:** Mineral perteneciente al sistema cristalino cúbico, grupo de la espinela, de fórmula química  $FeCr_2O_4$ , frecuentemente con Mg, Al, entre otros, de color negro parduzco o negro, opaco a sub-translúcido, con raya parda oscura, hábito prismático o granudo, brillo sub-metálico a grasoso, fractura concoidea, carente de exfoliación y dureza relativa de 5.5-6.5.

**Cumulativa, textura:** Cristales de alta densidad dispuestos en forma estratiforme, debido al asentamiento gravitacional en el fondo de la cámara magmática.

**Epidoto:** Aluminosilicato hidratado de calcio perteneciente al sistema cristalino monoclinico, con un polimorfo ortorrómbico, clase de los sorosilicatos, de fórmula general  $Ca_2(Al,Fe,Mn)Al_2Si_3O_{12}(OH)$ , con hábito prismático o granudo, exfoliación en dos direcciones (imperfecta y basal perfecta, respectivamente), fractura concoidea, color verde en variadas tonalidades, amarillo, gris y negro, transparente a translúcido, raya incolora a gris, brillo vítreo, y dureza relativa de 5.5-7. Se encuentra como producto de alteración en rocas máficas.

**Espinela:** Mineral perteneciente al sistema cristalino cúbico, grupo de la espinela, de fórmula química  $MgAl_2O_4$ , frecuentemente con Fe, Mn, Cr, Zn, Co, entre otros, de color negro, castaño, ocre, verde, rosado, rojo, violeta o azul, dependiendo de la cantidad de impurezas, transparente a translúcido, con raya blanca, hábito prismático o granudo, brillo vítreo, fractura irregular, carente de exfoliación y dureza relativa de 8.

**Euhedral (idiomórfico):** Cristal con caras bien definidas.

**Fanerítica, granularidad:** Cristales con tamaño superior a 0,06 mm. Se distinguen cuatro tipos: grano fino (0,06-2 mm), grano medio (2-5 mm), grano grueso (5-30 mm) y grano muy grueso (> 30 mm).

**Gabro, grupo:** Rocas plutónicas máficas, de coloración verdinegra moteada de blanco, constituidas fundamentalmente por plagioclasa cálcica y piroxeno, con menores cantidades de olivino, hornblenda o biotita. Es un constituyente de la parte inferior de la corteza oceánica. Contiene espinelas, apatito, epidoto, calcita, clorita, anfíboles, serpentina, rutilo, granate, cuarzo y feldespatos alcalinos como posibles accesorios. Presenta texturas ofítica, subofítica, pegmatítica, corona y cumulativa, de grano grueso a fino. Se clasifica en tres tipos de acuerdo a las características mineralógicas particulares: gabro (mayor proporción de clinopiroxeno en relación con el ortopiroxeno), norita (mayor proporción de ortopiroxeno en relación con el clinopiroxeno) y gabronorita (proporciones similares de clinopiroxeno y ortopiroxeno).

**Garnierita:** Mezcla en diferentes proporciones de silicatos hidratados de níquel y magnesio, distribuidos entre las fases extremas de la serpentina niquelífera  $(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  y la pimelita  $(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ , donde se incluyen especies como: talco niquelífero  $(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , sepiolita niquelífera  $(\text{Mg,Ni})_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ , clorita niquelífera, nimita  $(\text{Ni,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ , nontronita niquelífera, vermiculita niquelífera, entre otras. Se presenta como una mezcla heterogénea de color verde manzana claro a azulado, con hábito escamoso, brillo resinoso y dureza relativa de 2.5. Constituye una mena secundaria de níquel.

**Holocristalina, cristalinidad:** Fenocristales rodeados de cristales de menor tamaño, con ausencia de vidrio volcánico.

**Harzburgita:** Peridotita compuesta esencialmente por olivino y ortopiroxeno (enstatita-hiperestena).

**Laterita:** Suelo residual arcilloso formado por intensa meteorización en condiciones climáticas tropicales, las cuales favorecen la lixiviación.

**Lherzolita:** Peridotita compuesta por olivino, ortopiroxeno (enstatita-hiperesteno) y clinopiroxeno (augita-diópsido).

**Lixiviación:** Lavado o remoción de los componentes solubles de un suelo, en forma de soluciones iónicas descendentes, debido a la percolación de agua meteórica.

**Metasomatismo:** Alteración mineral ocurrida mediante reacciones químicas entre los minerales constituyentes de una roca y soluciones hidrotermales, conservándose los rasgos texturales originales.

**Meteorización:** Alteración física y/o química *in situ* de las rocas, como consecuencia de su exposición a la intemperie (agentes atmosféricos).

**Olivino (peridoto):** Silicato ferro-magnesiano que presenta una serie isomorfa completa desde la forsterita  $(\text{Mg}_2\text{SiO}_4)$  hasta la fayalita  $(\text{Fe}_2\text{SiO}_4)$ , pasando por la composición intermedia (crisolita)  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ . Pertenece a la clase de los nesosilicatos y cristaliza en el sistema ortorrómbico. Es un mineral de color verde oliva, verde amarillento y verde grisáceo hasta pardo y castaño, a medida que aumenta el contenido de hierro, transparente a translúcido, con raya incolora a verde pálido, hábito granudo y masivo, brillo vítreo a grasoso, fractura concoidea, carente de exfoliación y dureza relativa de 6.5-7. Se altera comúnmente a serpentina y óxidos de hierro.

**Ortopiroxeno, serie:** Serie isomorfa del piroxeno con bajo contenido cálcico, conformada por la enstatita  $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ , hiperesteno  $(\text{Fe,Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$  y ferrosilita  $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ , desde el extremo más magnesiano hasta el extremo más ferruginoso. Las especies son desde amarillento, verde pálido, verde oliva y verde grisáceo hasta verde castaño y negro, a medida que aumenta el contenido de hierro,

translúcidas, con brillo vítreo, nacarado o submetálico, y fractura irregular. Se altera comúnmente a bastita.

**Peridotita:** Roca plutónica ultramáfica de color verdoso a negro, constituida esencialmente por olivino y piroxeno. Es el componente principal del manto terrestre, y también forma parte de la corteza oceánica. Contiene serpentina, espinelas, oxihidróxidos de hierro, clorita, granate, sulfuros metálicos, metales nativos, apatito, esfena, anfíbol y plagioclasa cálcica como accesorios posibles. Se clasifica en tres tipos de acuerdo a las características mineralógicas particulares: lherzolita, harzburgita y werlita. Las texturas que presenta son reticulada, pegmatítica y cumulativa, de grano grueso a medio.

**Piroxenita:** Roca peridotítica compuesta esencialmente por piroxeno (en más de un 60%), con cantidades menores de olivino.

**Piroxeno:** Silicato ferro-magnesiano-cálcico de fórmula general  $(Mg,Fe,Ca)_2Si_2O_6$ , perteneciente a la clase de los inosilicatos de cadena simple. Se divide en dos series isomorfas completas: serie del ortopiroxeno (serie de la enstantita) y serie del clinopiroxeno (serie del diópsido), de acuerdo al sistema de cristalización (ortorrómbico o monoclinico, respectivamente). En general, presenta hábito prismático a granudo, con exfoliación buena a lo largo de dos direcciones a casi ángulos rectos entre sí, raya incolora a grisácea y dureza relativa de 5.5.

**Plagioclasa:** Serie isomorfa continua de aluminosilicato sódico-cálcico, de fórmula general  $NaAlSi_3O_8$  hasta  $CaAl_2Si_2O_8$ , desde el extremo sódico (albita pura) hasta el extremo cálcico (anortita pura), perteneciente a la clase de los tectosilicatos, grupo del feldespato, sistema de cristalización triclinico. Se caracteriza por ser incolora, blanca, gris y azulada, transparente a translúcida, con raya incolora, hábito tabular o granudo, brillo vítreo a nacarado, exfoliación en dos direcciones (buena y basal perfecta, respectivamente), y dureza relativa de 6. La plagioclasa sódica se altera comúnmente a sericita y caolinita; mientras que la plagioclasa cálcica lo hace comúnmente a epidoto y calcita.

**Porfidoclastica, fábrica:** Fenocristales (porfidoclastos) en una matriz de grano fino.

**Saprolita:** Manto superficial de material meteorizado, suprayacente al cuerpo de roca parental, del cual conserva parte de la mineralogía.

**Sericita:** Aluminosilicato hidratado de potasio, variedad de moscovita de grano muy fino, de fórmula química  $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ , perteneciente al sistema cristalino monoclinico, clase de los filosilicatos. Es incolora, transparente, con hábito escamoso, exfoliación basal perfecta, deformación plástica y brillo sedoso. Se presenta como producto de alteración hidrotermal.

**Serpentina:** Silicato magnesiano hidratado de fórmula química  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ , perteneciente a la clase de los filosilicatos. Presenta tres polimorfos principales: antigorita, lizardita y crisotilo, los cuales cristalizan en el sistema monoclinico, caracterizados por ser translúcidos, con raya incolora, deformación plástica, exfoliación perfecta en una dirección y dureza relativa entre 2.5-4. La antigorita y lizardita presentan hábito lamelar, fibro-lamelar y masivo, diferentes tonalidades abigarradas de verde, blanco, negro, marrón, rojo y morado, con brillo grasoso a ceroso. El crisotilo pertenece al grupo de los asbestos, es de color blanco, con hábito fibroso y brillo sedoso. La serpentina se encuentra como principal mineral secundario en rocas ultramáficas; a su vez, se altera a talco y sepiolita.

**Serpentinita:** Roca de origen ultramáfico, compuesta esencialmente por minerales del grupo de la serpentina, derivados del metasomatismo de los silicatos primarios magnesianos.

**Sílice:** Silicato simple de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), perteneciente a la clase de los tectosilicatos, incoloro a blanco cuando se encuentra puro, de numerosas coloraciones cuando posee impurezas, transparente a translúcido, con raya incolora, brillo vítreo a graso, fractura concoidea y carente de exfoliación. Principalmente se presenta en forma fenocristalina, dentro del sistema hexagonal, como distintas variedades de cuarzo, con hábito prismático a granudo, y dureza relativa de 7; la calcedonia es una variedad criptocristalina, con brillo ceroso a mate. Cuando la sílice incluye un elevado porcentaje de agua, se presenta amorfa, constituyendo el ópalo, con hábito masivo, botroidal, mamelar, nodular y estalactítico, brillo vítreo a resinoso, y dureza relativa de 5.5. El ópalo se presenta como precipitado coloidal residual en rocas ultramáficas alteradas; la variedad calcedonia se presenta como producto de alteración del ópalo.

**Subhedral (subidiomórfico):** Cristal con algunas caras bien definidas, y otras mal definidas.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Aldanmaz, E., Gourgaud, A. y Kaymakci, N. (2005).** Revista de Geodinámica, 29: 277-316.
- Beccaluva, L., Contorti M., Giunta, G., Ituirralde-Vinent, M., Navarro, E., Siena, F. y Urbani F. (1995).** Secciones transversales a través de unidades ofiolíticas de los márgenes meridionales y septentrionales de la placa caribeña en Venezuela (cordilleras septentrionales) y en Cuba central. En: 1º Encuentro Geológico Italo-Latinoamericano, Venezuela-Cuba. 23 pp.
- Beck, C. (1980).** La napa ofiolítica de Loma de Hierro, cadena del Caribe central, Venezuela. En: VIII Reunión Anual de Ciencias de la Tierra. Marsella: Sociedad Geológica de Francia. 31 pp.
- Beck, C. (1985).** La cadena del Caribe en el meridiano de Caracas: geología, tectogénesis, papel en la evolución geodinámica Mesozoica-Cenozoica del Caribe meridional. Tesis de doctorado, Universidad de Ciencias y Técnicas de Lille, Francia. 462 pp.
- Beck, C. (1986).** Geología de la cadena del Caribe en el meridiano de Caracas, Venezuela. Public. No. 14. Francia: Sociedad Geológica de Nord. 462 pp.
- Bellizzia, A. (1967).** Rocas ultramáficas en el sistema montañoso del Caribe y yacimientos minerales asociados. Bol. Geol. 8(16): 159-198. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Blatt, H., Tracy, R. y Owens B. (2006).** Petrología ígnea, sedimentaria y metamórfica. 3ra. Edición. Nueva York, USA: W.H. Freeman and Company. 530 pp.
- Dewey, J.F. y Bird, J.M. (1971).** Origen y emplazamiento de la suite ofiolítica: ofiolitas apalachanas en Terranova. Revista de Investigación Geofísica, Vol. 76, No. 14, pp. 3179-3206. Nueva York: Unión Geofísica Americana.
- Ehlers, E. y Blatt, H. (1982).** Petrología ígnea, sedimentaria y metamórfica. Nueva York, USA: W.H. Freeman and Company. 732 pp.
- Ferrer, M. y Rincones D. (2007).** Caracterización petrográfica de los afloramientos de rocas ultramáficas de la zona de Tamanaco y sus alrededores, Tinaquillo,

estado Cojedes. Trabajo Especial de Grado no publicado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, UCV, Caracas. 143 pp.

**Girard, D. (1981).** Petrología de algunas series espilíticas mesozoicas del dominio Caribe y de las asociaciones magmáticas de la isla de Tobago. Tesis de doctorado, Universidad de Bretaña Occidental, Francia. 229 pp.

**Girard, D., Beck, C., Stephan, J.F., Blanchet R. y Maury, R.C. (1982).** Petrología, geoquímica y significado geodinámico de algunas formaciones volcánicas cretácicas pericaribeñas. Bol. 24(3): 535-544. Marsella: Sociedad Geológica de Francia.

**Grande, S. (2000a).** Guía de petrología ígnea y metamórfica (sin publicar). Escuela de Geología, Minas y Geofísica, UCV, Caracas.

**Grande, S. (2000b).** Guía de yacimientos minerales metálicos (sin publicar). Escuela de Geología, Minas y Geofísica, UCV, Caracas.

**Graterol, M. (1967).** Investigación petrográfica y mineralógica de las peridotitas y serpentinitas de Loma de Hierro, estados Aragua y Miranda. Bol. Geol. 8(16): 215-225. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.

**Graterol, M. (1972).** Petrogénesis de la peridotita de Loma de Hierro, estado Aragua. En: VI Conferencia Geológica del Caribe, Margarita, pp. 329-336.

**Heinrich, E. (1960).** Petrografía Microscópica. España: Ediciones Omega. 320 pp.

**Hellebrand, E., Snow, J. E., Dick, H. J. B. y Hofmann A.W. (2001).** Naturaleza, 410: 677-681.

**Huang, W. (1968).** Petrología. México: Editorial Hispano Americana. 546 pp.

**Hurlbut, C. y Klein C. (1996).** Manual de mineralogía. 4º Edición. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A. 368 pp.

**Kerr, P. (1965).** Mineralogía Óptica. Nueva York, USA: McGraw-Hill.

**Konigsmark, T. (1965).** Geología del área de Guárico septentrional - lago de Valencia. Bol. Geol. 6(11): 209-285. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.

**Lavié, H. (1967).** Evaluación de los yacimientos de lateritas niquelíferas en Loma de Hierro, estados Aragua y Miranda. Bol. Geol. 8(16): 199-214. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.

- Más Vall, J. (1965).** Petrología de las rocas ígneas. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, UCV, Caracas. 210 pp.
- Méndez, J. (2006).** Petrología. Facultad de Ciencias, UCV, Caracas. 363 pp.
- Menéndez V. de V., A. (1966).** Tectónica de la parte central de las Montañas Occidentales del Caribe, Venezuela. Bol. Geol. 8(15): 116-119. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Minera Loma de Níquel (2004).** Reporte Geológico (sin publicar). Gerencia de Mina, Departamento de Geología. 108 pp.
- Minera Loma de Níquel (2007).** Portal de intranet empresarial, inédito. [Consulta: 2007, diciembre]
- Navarro, F. (1983).** Petrología y petrogénesis de las rocas metavolcánicas del Grupo de Villa de Cura. En: GEOS (28), pp. 170-317.
- Ortiz, F. (2004).** Características mineralógicas y petrográficas del yacimiento de níquel de Cerro Matoso. [Revista Dyna en línea: Vol. 71, No. 142, pp. 11-23] Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/496/49614202.pdf> [Consulta: 2007, diciembre]
- Panayiotou, A. (1978).** La química y mineralogía de los depósitos de cromita podiformes en las serpentinitas del bosque de Limassol. En: Depósitos Minerales, Vol. 13, pp. 259-274.
- PDVSA, Intevep (2007).** Código Geológico de Venezuela. Disponible: <http://www.pdvsa.com/lexico/> [Consulta: 2007, diciembre]
- Piburn, M. (1968).** Metamorfismo y estructura del grupo Villa de Cura, norte de Venezuela. Bol. Geol. 9(18): 183-290. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Pirela, J. (2007).** Estudio químico y petrográfico de un perfil laterítico asociado a la laterita niquelífera de Loma de Hierro. Trabajo Especial de Grado no publicado, Facultad de Ciencias, UCV, Caracas. 170 pp.
- Proenza, J., Melgarejo J.C. y Gervilla F. (1997).** Proceso de alteración a ferricromita en Cr-espinelas de cromitas y peridotitas del yacimiento Mercedita. Bol. Soc. Esp. Min., 20-A, 29-30.
- Qi, Q., Taylor, L. L. y Zhou, X. (1995).** Revista de Petrología, 36: 55-79.

- Sawkins, F.J. (1984).** Depósitos metálicos en relación a las placas tectónicas. Nueva York: Springer-Verlag. 250 pp.
- Shagam, R. (1960).** Geología de Aragua central. Bol. 71(3): 249-302. Colorado: Sociedad Geológica Americana.
- Smith, R. (1952).** Geología de la región de Los Teques-Cúa. Bol. Geol. 2(6): 333-406. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Talukdar, S., Loureiro, D., Navarro, E., Urbani F. y Ostos, M. (1981).** Modelo de la tectónica de placas para la evolución del Sistema Montañoso del Caribe. AsoVAC, Caracas. 212 pp.
- Teggin, D.E, Maynard, J.B., Benhayon, M. y Jimenez, E. (1985).** Estudio geoquímico de las lateritas níquelíferas de Loma de Hierro, estado Aragua, Venezuela. En: VI Congreso Geológico Venezolano, Caracas, 4248-4275.
- Turner F. y Verhoogen J. (1978).** Petrología, ígnea y metamórfica. España: Ediciones Omega. 726 pp.
- Urbani, F. (2005).** Síntesis de la nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Boletín Técnico en línea: IMME, Vol. 43, No. 2, pp. 1-10. Disponible: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0376-723X2005000200001&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2005000200001&lng=es&nrm=iso) [Consulta: 2007, diciembre]
- Wager, L.R., Brown G.M. y Wadsworth W.J. (1960).** Revista de Petrología, 1: 364-398.
- Winkler, H.G.F. (1979).** Petrogénesis de rocas metamórficas. Nueva York: Springer-Verlag. 348 pp.
- Wyllie, P. J. (1971).** La Tierra Dinámica. Nueva York: John Wiley & Sons, 1971.

***Anexo 1:***  
***Planillas de descripción***  
***petrográfica de las muestras***

**No. Muestra:** 4538/936

**Fecha:** 05-08-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,15	Olivino
Porfidoclastos	1,1 - 5,5	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	40
2- Serpentina	39
3- Ortopiroxeno (enstatita)	15
4- Opacos	5
5- Cr-espinela	1

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 4927/722

**Fecha:** 11-08-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,15	Olivino
Porfidoclastos	0,8 - 3,5	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	40
2- Serpentina	40
3- Ortopiroxeno (enstatita)	15
4- Opacos	4
5- Cr-espinela	1

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 5644/1053

**Fecha:** 12-08-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,15	Olivino
Porfidoclastos	0,8 - 3,8	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 2

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	32
2- Serpentina	31
3- Oxihidróxidos de hierro	13
4- Ortopiroxeno (enstatita)	12
5- Opacos	9
6- Cr-espinela	3

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 6107/781

**Fecha:** 18-08-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,15	Olivino
Porfidoclastos	1,1 - 4,2	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	41
2- Serpentina	26
3- Ortopiroxeno (enstatita)	19
4- Oxihidróxidos de hierro	10
5- Opacos	3
6- Cr-espinela	1

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 6423/1253

**Fecha:** 19-08-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,2	Olivino
Porfidoclastos	1,1 - 2,9	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	49
2- Serpentina	30
3- Ortopiroxeno (enstatita)	15
4- Opacos	5
5- Cr-espinela	1

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 6548/943

**Fecha:** 25-08-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,2	Olivino
Porfidoclastos	1,1 - 5	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	46
2- Ortopiroxeno (enstatita)	25
3- Serpentina	24
4- Opacos	4
5- Cr-espinela	1

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 7294/847

**Fecha:** 26-08-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,15	Olivino
Porfidoclastos	0,8 - 3,1	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 2

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	34
2- Serpentina	32
3- Ortopiroxeno (enstatita)	15
4- Oxihidróxidos de hierro	13
5- Opacos	5
6- Cr-espinela	1

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 7396/588

**Fecha:** 02-09-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,2	Olivino
Porfidoclastos	0,8 - 4,2	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Ortopiroxeno (enstatita)	38
2- Olivino	34
3- Serpentina	13
4- Opacos	9
5- Cr-espinela	4
6- Oxihidróxidos de hierro	2

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 7570/899

**Fecha:** 09-09-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( x ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( x ) Pseudomorfos

( x ) Reticulada

( ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
Matriz	0,2	Olivino
Porfidoclastos	1 - 4,8	Ortopiroxeno

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Olivino	43
2- Ortopiroxeno (enstatita)	31
3- Serpentina	19
4- Opacos	5
5- Cr-espinela	2

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Harzburgita serpentinizada con espinela

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Harzburgita con espinela

**No. Muestra:** 8377/991

**Fecha:** 17-09-08

**Petrografía por:** Birbe, N.

**CRISTALINIDAD**

( x ) Holocristalina

**GRANULARIDAD**

( x ) Fanerítica

**FÁBRICA**

( ) Porfidoclástica

**Texturas:**

( ) Pseudomorfos

( ) Reticulada

( x ) Cumulativa

TAMAÑOS	Promedio (de mm - a mm)	Observaciones
	5 - 0,8	Plagioclasa, Clinopiroxeno y Olivino

**Transparencia de la sección [clara (1) a oscura (5)]:** 1

**MINERALOGÍA (en orden de abundancia):**

Mineral	%
1- Plagioclasa	36
2- Clinopiroxeno (diópsido)	32
3- Olivino	18
4- Serpentina	7
5- Mg-Clorita	4
6- Opacos	2
7- Epidoto (clinozoisita)	1

**CLASIFICACIÓN GENERAL**

( x ) Plutónica

**NOMBRE PETROGRÁFICO:** Gabro olivínico cumulativo (crescumulado de piroxeno y olivino con heteroadcumulado de plagioclasa), metasomatizado

**NOMBRE PROTOLÍTICO (si es posible):** Gabro olivínico cumulativo