



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Modelo geológico descriptivo de las lateritas ferroniquelíferas del depósito San Felipe, Camagüey, Cuba

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Geológicas

Rosa María Cobas Botey

Moa, 2017



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Modelo geológico descriptivo de las lateritas ferroniquelíferas del depósito San Felipe, Camagüey, Cuba

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Geológicas

AUTOR: Ing. Rosa María Cobas Botey

TUTORES: Dr. C. Francisco Formell Cortina
Dr. C. León Ortelio Vera Sardiñas †

Moa, 2017

AGRADECIMIENTOS

He pensado mucho por donde comenzar a agradecer a los que han contribuido a que llegue este momento, por temor a obviar alguno, porque se haga la lista interminable, pero de antemano agradezco a todos los que de una forma u otra han estado de mi lado para que lleve a cabo esta investigación y concluya con los resultados esperados.

Agradezco a la Empresa Geología Santiago, actual Empresa Geominera Oriente que me ubicó desde mi graduación a trabajar en la prospección y exploración de las cortezas de intemperismo de la región oriental y central y me permitió conocer bien de cerca las regularidades de estos depósitos por más de 27 años y acumular toda la experiencia que sobre el tema me permiten evaluar al depósito San Felipe en este trabajo y agradezco también a todos mis compañeros que desde el año 1982 trabajaron junto a mí y colaboraron conmigo. Allí conocí a la casi totalidad de los depósitos de la región oriental, de Moa y Nicaro-Pinares de Mayari.

A continuación relaciono a las personas que no podré dejar de mencionar de forma particular.

Agradezco:

A Frank, por su paciencia y apoyo en toda la asunción del tema, eran muchas las ideas al inicio, la definición del problema y de todo el diseño y estructura del documento que reflejaría los resultados de la investigación,

A Héctor Rodríguez que a distancia ha estado al tanto de mi trabajo y ha contribuido con su desarrollo.

A José Arias por su colaboración en la realización de mapas y perfiles presentado en este trabajo.

A todos los profesores del ISMM, Carlos, Nicolás, Yuri, Dayle, Gerardo, Rafael, Iván y los más jóvenes que no recuerdo sus nombres, los cuales estuvieron al tanto y participaron en el desarrollo de esta investigación aportando en las diferentes sesiones científicas.

A Teresa Hernández y demás compañeros de postgrado del ISMM, de los cuales he recibido su apoyo,

A Alexis Otero y otros compañeros de la Revista Minería y Geología.

A Angel y Tatiana que comenzamos juntos en este doctorado curricular y hemos estado colaborando entre nosotros para poder salir adelante y llevar a feliz término las investigaciones que hemos comenzado juntos.

A Alfonso Chang que ha insistido tanto para que me apure, que entregue ya, para que al igual que él lleve a término esta tesis,

A Rojas Purón por su oponencia para la predefensa, la cual me ayudó mucho a terminar de ordenar mis ideas y en general a la calidad del trabajo,

A Ramón Peña que tan gentilmente aprobó hacer la oponencia a este trabajo colaborando para obtener un mejor producto científico.

Al Consejo Científico del Servicio Geológico de Cuba el cual me permitió presentarles el trabajo y sus resultados,

A la Dirección de Geología del Ministerio de Energía y Minas, donde laboro actualmente por permitirme llevar a término esta investigación.

A los profesores del ISMM Gerardo Orozco y Nicolás Muñoz por sus acertadas sugerencias en su función de garantes.

A la Oficina Nacional de Recursos Minerales y los especialistas que evaluaron el trabajo ya terminado con sus sugerencias.

DEDICATORIA

A Frank, Rositica y mis nietos Fabio y Roxana, a Papa, Mama y Angel Luis, que ya no están, pero sentían satisfacción al saber que estaba en este empeño, a Pancho, Licy, Juan Carlos y familia, María, Lola y familia, Idania y familia, Graciela y familia, Rubén y familia.

SÍNTESIS

Las lateritas cubanas han sido estudiadas durante décadas por diferentes autores, el mayor énfasis, ha estado en las que se desarrollan sobre las ofiolitas orientales. Las ofiolitas desarrolladas en la región central, a pesar que desde el 1907 fueron descritas por Spencer, es solo en la década de los 90 que se profundiza en su estudio geológico, revelándose las características de las cortezas desarrolladas en el depósito San Felipe. La sistematización de esta información existente para la confección del modelo geológico descriptivo del depósito, significa una importante contribución al conocimiento científico de las lateritas cubanas.

Este modelo geológico descriptivo muestra las características del depósito San Felipe y pone de relieve las marcadas diferencias del mismo en relación con aquellos de la región oriental, lo que permite considerarlo como un yacimiento excepcional para Cuba y eventualmente de los muy escasos en el mundo. Este modelo permitirá establecer las guías de exploración y por tanto posibilitará una mejor estimación de recursos así como una mejor planificación de los trabajos de exploración y explotación minera.

Para confeccionar el modelo se ha recopilado, procesado y evaluado la información con que se cuenta sobre la geología del depósito que incluye más de 1000 pozos de perforación vertical, con alrededor de 15 000 muestras y determinaciones químicas para 7 elementos (Fe, Ni, Co, SiO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃, MgO) por el método de ICP (Plasma Inductivamente Acoplado), se revisaron además, estudios geofísicos, (método SEV-PI, cargabilidad, resistividad, GPR, etc.), estudios mineralógicos realizados por diferentes métodos.

Esta investigación permitió elaborar el modelo geológico descriptivo, y clasificarlo como saprolítico laterítico de níquel más cobalto, aportando una herramienta o guía para la futura elaboración de modelos geológicos descriptivos en Cuba y una metodología aplicable para sistematizar y evaluar la información de todo tipo de depósitos minerales, considerando que cada yacimiento es un objeto geológico diferente.

Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIA	III
SÍNTESIS.....	IV
<i>Relación de figuras al texto.....</i>	<i>viii</i>
<i>Relación de tablas al texto</i>	<i>xi</i>
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. HISTORIA DE LAS INVESTIGACIONES PRECEDENTES.....	5
1.1.2. Modelos geológicos.....	12
1.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS, CLIMÁTICAS Y ECONÓMICAS DE LA REGIÓN.....	19
2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL DEPÓSITO SAN FELIPE.....	19
2.2. RELIEVE.....	20
2.3. CLIMA Y FLORA	21
2.4. HIDROGRAFÍA	22
2.5. ECONOMÍA	23
CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA.....	25
3.1. GEOLOGÍA DE DEPÓSITOS DE CORTEZAS DE INTEMPERISMO.....	29
CAPÍTULO 4. MODELO GEOLÓGICO DESCRIPTIVO DEL DEPÓSITO SAN FELIPE	35
4.1. TIPO DE DEPÓSITOS Y MATERIALES ASOCIADOS	38
4.1.2. Ejemplos de depósitos	38
4.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CONOCIMIENTO DESCRIPTIVO, GENÉTICO Y CONCEPTUAL.....	40

4.3. AMBIENTE REGIONAL	43
4.3.1 <i>Ambiente Geotectónico</i>	44
4.3.2 <i>Relación Temporal</i>	45
4.3.3. <i>Duración de procesos de mineralización</i>	46
4.3.4. <i>Relación con las estructuras</i>	47
4.3.5. <i>Relación a las rocas ígneas</i>	47
4.4. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL DEPÓSITO.....	48
4.4.1. <i>Dimensiones y vista en planta</i>	49
4.4.2. <i>Extensión vertical y forma</i>	49
4.4.3. <i>Perfil de intemperismo en el depósito San Felipe</i>	51
4.4.4. <i>Composición de la roca madre</i>	54
4.5. CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS.....	55
4.5.1. <i>Sondeo eléctrico vertical y polarización inducida</i>	55
4.5.2. <i>Susceptibilidad magnética</i>	56
4.5.3. <i>Método de georadar (GPR –Ground Penetrating Radar)</i>	57
4.5.4. <i>Aerogeofísica</i>	58
4.5.5. <i>Magnetometría</i>	58
4.6. CARACTERÍSTICAS DE LAS MENAS Y DE LA GANGA.....	58
4.6.1. <i>Mineralogía, texturas, estructuras y tamaño de los granos</i>	60
4.7. INTEMPERISMO. PROCESOS SUPERGÉNICOS	67
4.7.1. <i>Reacciones y factores controladores</i>	67
4.7.2. <i>Efectos micro y macroclimáticos</i>	67
4.7.3. <i>Efectos de las condiciones hidrogeológicas</i>	68
4.8. CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS	69
4.8.1 <i>Elementos minoritarios</i>	81
4.8.2. <i>Elementos traza y asociación de elementos</i>	83
4.9. PETROLOGÍA DE ROCAS ÍGNEAS ASOCIADAS	85
4.10. TEORÍA DE FORMACIÓN DEL DEPÓSITO.....	86
4.10.1. <i>Fuentes de níquel y de cobalto</i>	90
4.11. GUÍA PARA LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS	91

Modelo Geológico Descriptivo del depósito San Felipe, Camagüey, Cuba.	vii
4.11.1. <i>Geología y geofísica</i>	91
4.11.2. <i>Geoquímica</i>	92
4.12. GRÁFICO TONELAJE LEY	92
4.13. RESUMEN DEL MODELO GEOLÓGICO DESCRIPTIVO SAPROLÍTICO LATERÍTICO DE NI Y Co.....	93
CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

Relación de figuras al texto

Figuras	Páginas
Figura. 1.2.1. Pozos perforados durante la prospección en diferentes redes.	17
Figura 2.1.1. Ubicación geográfica del depósito San Felipe.	20
Figura 2.2.1. Mapa hipsométrico San Felipe. (Cobas, 2016).	21
Figura 2.4.1. Red de drenaje de la Meseta de San Felipe. (Cobas 2015)	23
Figura 3.1.1. Esquema de distribución de las ofiolitas en Cuba.	28
Figura 3.1.2. Mapa geológico de la región. (Arias y Cobas 2016, inédito).	28
Figura 4.1. Diagrama del modelo del depósito San Felipe, Cobas 2017. Adaptado Singer.	36
Figura 4.2. Composición química de San Felipe (SF), Yamanigüey Cuerpo I (Yamanigüey), Levisa, Pinares de Mayarí (Pinares), Cantarrana y Piloto	37
Figura 4.1.2.1. Diagrama ternario Al/(Mg,Ni)/(Fe,Cr) con los datos de TEM-AEM de las esmectitas de San Felipe y de Murrin Murrin, Gaudin et al (2003).	40
Figura 4.4.1. Mapa geológico (distribución de la corteza de intemperismo) del depósito San Felipe, Cobas y Formell (1999)	48
Figura 4.4.1.1. Modelo digital del terreno sombreado y contorno de la corteza de intemperismo de San Felipe.	49
Figura 4.4.1.2. Foto de San Felipe que muestra la extensión de la corteza de intemperismo.	49
Figura. 4.4.2.1. Vista vertical del depósito San Felipe. Cobas 2016.	50
Figura 4.4.3. Perfil de intemperismo del depósito San Felipe. Cobas 1999.	51
Figura 4.4.4. Diagrama petrológico AFM de San Felipe. Rodríguez, 2001. Inédito.	54

Figura 4.5.1.1. Modelo de Interpretación según SEV-PI.	56
Figura 4.5.3.2. Resultados del Georadar y su coincidencia con pozos de perforación en San Felipe.	57
Figura 4.6.1.1. Espectro de DRX. Muestras de limonitas: lz: lizardita, gt: goethita, hem: hematites, qtz: cuarzo.	60
Figura 4.6.1.2. Espectro de DRX. Muestras de ocre texturales limoníticos del depósito San Felipe (adaptado de Marín et al, 2011). Minerales: sm: esmectita, lz: lizardita, mgh: maghemita.	61
Figura 4.6.1.3. Imagen de electrones retrodispersados de agregado botroidal criptocristalino de cuarzo con esmectita y de agregados criptocristalinos de esmectita con lizardita y maghemita.	61
Figura 4.6.1.4. Espectro de DRX. Muestras de serpentinas nontroníticas del depósito San Felipe (adaptado de Marín et al, 2011). Minerales: sm: esmectita, lz: lizardita, mgh: maghemita.	62
Figura 4.6.1.5. Imágenes de microscopía óptica en nicoles paralelos y nicoles cruzados de cristales de piroxeno totalmente pseudomorfizados a lizardita.	63
Figura 4.6.1.6. Imágenes de microscopía óptica en nicoles paralelos y cruzados. Textura mallada típica de la alteración de olivino a lizardita.	64
Figura 4.6.1.7. Imágenes de microscopía óptica en nicoles paralelos y nicoles cruzados de bloques de agregados botroidales de cuarzo.	64
Figura 4.6.1.8. Electrones retrodispersados de cristales de clorita rodeados por agregados criptocristalinos de esmectita.	65
Figura 4.8.1. Comportamiento de los elementos químicos en cada horizonte.	69
Figura 4.8.2. Perfil en profundidad de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ y MgO en San Felipe.	70
Figura 4.8.3. Perfil en profundidad de Fe, Ni y Co en San Felipe.	71
Figura 4.8.4. Geoquímica del Pozo N4.4E10.6.	72

Modelo Geológico Descriptivo del depósito San Felipe, Camagüey, Cuba.	x
Figura 4.8.5. Geoquímica del Pozo N4.5E10.4.	72
Figura 4. 8. 6. Comportamiento de SiO ₂ y la sílice libre en el perfil de intemperismo	73
Figura 4. 8. 7. Fotos de las paredes de un pozo criollo con presencia de marshalita.	74
Figura 4. 8. 8. Fotos de las paredes de un pozo criollo con presencia de sílice libre.	75
Figura 4. 8. 9. Fotos de la presencia de sílice libre en fragmentos (ópalo, cuarzo, calcedonias).	76
Figura. 4.8.10. Distribución del Fe y el Co en las diferentes litologías del perfil de intemperismo.	77
Figura. 4.8.11. Distribución de Ni y SiO ₂ en las diferentes litologías del perfil de intemperismo.	78
Figura. 4.8.12. Distribución del Fe y el Mg en las diferentes litologías del perfil de intemperismo.	78
Figura. 4.8.13. Distribución del Mg y el Al en las diferentes litologías del perfil de intemperismo.	79
Figura. 4.8.14. Distribución del Ni, SiO ₂ y la humedad en las diferentes litologías del perfil de intemperismo.	81
Figura 4.8.1.1. Concentraciones de Cr ₂ O ₃ y MnO en las muestras analizadas	82
Figura 4.8.1.2. Concentraciones de TiO ₂ , P ₂ O ₅ y CaO	83
Figura 4. 8.2.1. Variación del contenido de elementos del grupo de las tierras raras a lo largo del perfil en un pozo.	84
Figura 4.8.2.2. Variación de la concentración de Rb, Nb y Th y (b) Ta, Hf, Sn y Tl a lo largo del perfil laterítico.	85
Figura 4.12.1. Gráfico Tonelaje Ley del depósito San Felipe.	92

Relación de tablas al texto

Tablas	Páginas
Tabla 1.1.2.1. Modelos de depósitos minerales residuales. Cox y Singer (1993).	13
Tabla 1.1.2.2: Tabla de modelos geológicos de BCGS y del USGS.	14
Tabla 3.2.1. Clasificación de los perfiles de los depósitos de intemperismo por diferentes autores.	35
Tabla 4.2.1. Composición química del depósito Shevchenko.	39
Tabla 4.4.3.1. Concentración de los elementos en la zona de las limonitas.	52
Tabla 4.4.3.2. Concentración de los elementos en la zona de las saprolitas.	53
Tabla 4.4.3.3. Concentración de los elementos en el basamento.	54
Tabla 4.6.1.1: Terminología alternativa de las lateritas níquelíferas y mineralogía general, de Samama (1986) y Freyssinet y otros (2005). Comparado con San Felipe, Cobas (2016).	65
Tabla 4.8.1. Códigos y descripción de los horizontes del perfil de intemperismo utilizados para San Felipe.	70
Tabla 4.8.2. Contenidos de sílice libre y SiO ₂ total por litologías.	73
Tabla 4.8.3. Composición química y humedad natural en % del pozo N8.4E11.5 con intercalación de corteza por gabro.	79

INTRODUCCIÓN

El conocimiento geológico del depósito ferro cobalto niquelífero San Felipe, enclavado en la provincia de Camagüey, Cuba, es de vital importancia para el futuro desarrollo minero metalúrgico de esta región. La sistematización de la información geológica existente acerca del depósito San Felipe contribuye al propósito de tener caracterizado el mineral aquí existente con el fin de incorporarlo a la producción de níquel más cobalto, que ocupa un lugar determinante en la economía cubana.

Es a partir de la década de los 90 que se realizan trabajos de prospección detallados en este depósito, conociendo las particularidades de sus características geológicas (mineralógicas, geoquímicas, geofísicas, etc.). Los resultados obtenidos durante estos trabajos en San Felipe y la experiencia en la prospección de depósitos lateríticos del norte oriental cubano, permitieron evaluar que se trata de un depósito único en Cuba; por lo que consideramos no es posible extrapolar los resultados científicos obtenidos del estudio de otras lateritas de Cuba, de manera mecánica a San Felipe. Para lograr mejor comprensión de las características y particularidades de este depósito es necesario sistematizar sus rasgos y atributos, para ello se decide elaborar el modelo geológico descriptivo, siguiendo la metodología empleada por el servicio geológico de los Estados Unidos. Cox y Singer (1986); Marsh et al (2010); Marsh and Anderson (2011).

La elaboración del modelo geológico es de vital importancia científica y económica: científica, porque se van a conocer las particularidades de este depósito, lo cual sentaría las bases para realizar futuras investigaciones y económica, por ser el níquel el primer recurso mineral de Cuba, todo ello facilitará su inclusión en el programa de desarrollo del níquel y en el potencial menífero del país, aportando al cumplimiento de lo planteado en el lineamiento 184 del VII Congreso del Partido Comunista de Cuba:

“Mejorar la posición de la industria del níquel en los mercados, mediante el incremento de la producción, elevación de la calidad de sus productos y reducción de los costos, logrando una mejor utilización de los recursos minerales”.

Al no existir una sistematización de la información geológica existente del depósito San Felipe, que permita poner al descubierto sus particularidades geológicas y que esta información sirva de base para futuras investigaciones y para la toma de decisiones del país encaminadas a su explotación, proponemos dar solución a esta problemática planteada, modelando el depósito San Felipe definiendo así el objetivo central de la investigación como:

Confeccionar el modelo geológico descriptivo de las lateritas ferroniquelíferas del depósito San Felipe.

Un modelo geológico descriptivo es “Información organizada sistemáticamente, que describe los componentes esenciales de una clase de depósito mineral”, las partes de un modelo son utilizadas para diferentes usos y propósitos como es: el establecimiento de guías para la exploración, la evaluación y estimación de recursos y para la formación de profesionales y la investigación”, Ludington et al (1985).

El objeto de esta investigación es el depósito laterítico ferroniquelífero San Felipe, se le realizara el modelo geológico descriptivo, para lo cual se recopila y

sistematiza la información geológica, creando una herramienta imprescindible para tomar decisiones en futuros proyectos de exploración geológica y exploración de explotación de estos recursos.

Los objetivos específicos para dar cumplimiento al objetivo central de confeccionar el modelo geológico descriptivo del depósito San Felipe son:

1. Sistematizar la información geológica existente utilizando el formato empleado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos para el níquel en los años 2010 y 2011.
2. Caracterizar el corte geológico de este depósito.
3. Describir los rasgos geoquímicos del depósito.
4. Establecer las particularidades geológicas que permitan diferenciarlos de otros depósitos lateríticos del país.

A partir de las experiencias e información acumulada durante los años 1982 - 1998 en la prospección y exploración en los depósitos lateríticos de la región oriental, posteriormente entre 1998 y el 2000 en los trabajos de prospección de San Felipe, en la región central, se confeccionará el Modelo Geológico Descriptivo de este último depósito, atendiendo a la metodología utilizada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, Marsh et al (2010); Marsh and Anderson (2011).

La novedad científica de esta investigación está en la sistematización de la información geológica del depósito San Felipe, inédita en su mayoría, mediante la elaboración de su Modelo Geológico Descriptivo que por primera vez es realizado en Cuba específicamente para un depósito, en este caso un depósito laterítico cubano.

La hipótesis de este trabajo establece que “con la elaboración del modelo geológico descriptivo del depósito laterítico San Felipe se sistematizan los atributos y será posible identificar las características de este depósito, que son únicas en el país, que lo hacen diferentes a los de la región oriental, ligados todos

genéticamente con el complejo ofiolítico cubano.” Las tareas propuestas para lograr su cumplimiento son:

- La revisión bibliográfica de todo lo relacionado con los modelos geológicos descriptivos tanto en Cuba como en el resto del mundo, prestando especial atención a los avances que muestran en esta materia el Servicio Geológico de los Estados Unidos, el Servicio Geológico de Canadá, el Servicio Geológico de Australia y las experiencias sobre el tema en Cuba, que, aunque aún es incipiente es importante tenerlas en cuenta.
- Revisión bibliográfica de la información relacionada con las lateritas en Cuba en la región nororiental y en la región de Camagüey y en diferentes regiones del mundo.
- Revisión bibliográfica y recopilación de la información del depósito San Felipe.
- Procesamiento de la información de San Felipe existente en los archivos de la Oficina Nacional de Recursos Minerales de Cuba.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta de forma resumida una evaluación sobre cómo se ha profundizado en el estudio de las lateritas ferro-cobalto-niquelíferas en Cuba, de manera sucinta desde la época del descubrimiento de Cuba, cuando en el libro de bitácora del Almirante Cristóbal Colón él reflejó la observación de unas montañas color de hierro en la región del nordeste de Oriente hasta las investigaciones realizadas posteriormente que han conducido al amplio conocimiento geológico de las lateritas cubanas en la región oriental y en los finales del siglo pasado al de las desarrolladas en la región de Camagüey, las cuales son el centro de este trabajo, representadas por el depósito San Felipe.

Este capítulo recoge además la información relacionada con el estado del arte de los modelos geológicos descriptivos, en los diferentes países donde se han desarrollado estas investigaciones, también recoge las experiencias sobre el tema, de diferentes investigadores en Cuba y se hace un análisis de la información geológica en trabajos inéditos, en archivos y de algunos artículos científicos publicados con el fin de asumir el tipo de modelo a elaborar. .

1.1. Historia de las investigaciones precedentes

La historia de las lateritas cubanas, se remonta a la época del descubrimiento de Cuba. En el libro de bitácora del gran almirante Cristóbal Colón, quedó anotada la

observación de unas montañas “color de hierro” en la región del nordeste de Oriente; Se refería indudablemente a las zonas que forman el horizonte superior de la corteza de intemperismo¹, las cuales comenzaron a ser denominadas lateritas al comienzo del siglo XX. Durante toda la etapa colonial, muy poco quedó registrado sobre estos minerales. En la segunda mitad del siglo XIX, el naciente imperialismo norteamericano se preocupa ya por explotar las riquezas minerales de Cuba y al efecto, en 1881, la empresa The Juragua Iron Co. solicitó concesiones al poder colonial español para explotar el mineral de hierro en un lugar llamado Firmeza al este de Santiago de Cuba, comenzando los trabajos de exploración en el 1883.

Hayes et al (1901) por primera vez describen someramente minerales en la región de la costa norte de Oriente en un informe titulado “Report on a geological reconnoissance of Cuba”, destacándose la gran riqueza de hierro de Cuba, con referencia principalmente a los óxidos de hierro limoníticos existentes en aquella región.

Las investigaciones geológicas que se realizaron en la etapa prerrevolucionaria en las lateritas cubanas estuvieron encaminadas en lo fundamental a las lateritas de la región nororiental y tenían un carácter eminentemente práctico, se trataba de ubicar la mayor cantidad de mineral de la más alta ley y explotarlo al más bajo costo, por eso todos los trabajos de investigación financiados por las compañías tenían como finalidad inmediata la irracional explotación de los recursos minerales de nuestro país. De esta época datan los trabajos de Spencer (1907); Cumings y Miller (1908); Hayes (1911); Cumings y Miller (1911), entre otros.

Numerosos estudios posteriores tratan diferentes temas relacionados con la geología de las cortezas de intemperismo que se desarrollan en Cuba. Entre ellos se destacan los trabajos de Adamóvich y otros (1962 y 1963); Buguelsky y Formell

¹ Sinónimo de corteza de meteorización, pero corteza de intemperismo es el término empleado en Cuba históricamente y fue tomado originalmente del término ruso que transliterado suena “kará buivietribaniyá”

(1967); Finkó, Korín y Formell (1967); Ogarkov y otros (1967); Formell y Buguelsky (1974); Formell (1979); Nagy y otros (1979); Formell y Oro (1980); Nikolaiev, Núñez y otros (1981); Víkov, Rodríguez y otros (1983); Rodríguez y Carralero (1984); Capote y otros (1984); Rodríguez y Rodríguez (1987); Rodríguez y Cobas (1995); Cobas y otros (1998); Gyarmatti, Núñez y otros (1991); Pérez-Alfaro y otros (2005); Lavaut (2003, 2005); Capote y otros (2009).

En los depósitos lateríticos de Camagüey se destacan los estudios realizados por Spencer (1907) el cual describe que recubren la cima de la Loma de San Felipe. Posteriormente en el 1911, San Felipe fue investigado por otros geólogos como Cummings y Miller, refiriendo que el distrito ha sido ya mencionado (Bull. 340, U.S.G. p 324, 1908). En este documento se plantea:

“Las características topográficas de San Felipe son extremadamente simples. Lecturas barométricas tomadas en el Río Pontezuela al Sur de la Loma de San Felipe, muestran una elevación de 190 pies sobre el nivel del mar, mientras que toda la cima de la loma varía de 400 a 500 pies, mientras que las laderas Sur y Este son bastante escarpadas...”.

“Al igual que en Moa y Mayarí, los minerales de San Felipe ocurren como un manto en serpentina peridotito alterado (...). La roca de la región es también serpentina por varias millas (...) no difieren esencialmente de las de Moa. En las laderas más bajas de las lomas, donde la erosión ha removido los productos de la descomposición de esta roca y a lo largo de los arroyos es fresca y sin alteraciones y los cristales grandes de piroxeno aparecen claramente en algunos lugares. El único producto de alteración que se sale de lo ordinario es la gran cantidad de horsteno² que aparece en forma de fragmentos y que se observa especialmente en las lomas adyacentes, donde el mineral de hierro, que sin duda estuvo presente en alguna época, ha sido removido por la erosión, pero la

² Evidentemente, los geólogos Cummings y Miller utilizaron erróneamente el término “horsteno” para describir la abundante sílice libre que se desarrolla en la región de distribución de las ultrabasitas serpentinizadas e intemperizadas, pero ese término se refiere a rocas silíceas también denominadas corneanas cuyo origen se relaciona con los procesos de metasomatismo de contacto y no como ocurre en San Felipe y sus alrededores donde la abundante sílice libre en forma de ópalos y calcedonias que se distribuye asociada a las ultrabasitas intemperizadas tiene un origen hipergénico.

superficie es irregular y está cubierta con una mezcla de horsteno y serpentina que por el intemperismo ha formado salientes agudos, (conocidos localmente como diente de perro). En muchas otras regiones donde la peridotita ha sido alterada a serpentina se ha hallado horsteno de características similares”.

Estos trabajos realizados por los diferentes autores antes del triunfo revolucionario en San Felipe, no pasaron de ser una evaluación solo de la presencia o no de mineral de hierro inicialmente y posteriormente para el mineral de níquel, sin una caracterización geológica detallada, fundamentándose solo la presencia de las diferentes litologías, los contenidos químicos y en la clasificación del mineral, no se llegó a realizar nunca una evaluación cercana a lo definido como modelo geológico descriptivo. La evaluación económica fue muy incipiente pues los trabajos de exploración fueron insuficientes para evaluar la potencialidad como un depósito de Fe y menos aún para un depósito de Ni.

Thieke et al (1981-87), durante la realización de los trabajos de levantamiento geológico complejo 1:50 000 y sus búsquedas acompañantes del polígono CAME III Camagüey, donde el objetivo del trabajo fue crear las bases geológicas en la provincia de Camagüey en un área de 4040 Km², para posteriores estudios de minerales sólidos, así como la ejecución de búsquedas acompañantes, fue San Felipe uno de los sectores escogidos para búsqueda por su importancia y extensión. Este informe define su interés para níquel obteniéndose un pronóstico de recursos de 4 a 6 MM Ton.

Escobar (1994), de la Empresa Geominera Camagüey, por encargo de la compañía Western Mining, realizó la perforación de 4 pozos en la meseta de San Felipe, empleando un conjunto de métodos que permitieron conocer el quimismo de la corteza de intemperismo (Ni, Co, Fe, etc.), la mineralogía de las menas niquelíferas, se realizaron además pruebas preliminares de beneficio del mineral a nivel de laboratorio. Estos 4 pozos alcanzaron profundidades entre 14.0 a 31.05 m. Se tomaron un total de 103 muestras para analizar en el "Bondar Clegg" de

Ottawa en Canadá, para análisis químico de Ni, Co por AAS y 102 análisis químico de SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅ y LOI y 103 análisis de 37 elementos por ICP, además se tomaron 23 muestras compósitas para análisis granulométrico y químico de Fe, Ni y Co por fracciones, mineralogía, Rx y ATD y 7 muestras de testigos de perforación, cercanas a la superficie, para docimasia de oro. Las diferencias en los contenidos de Ni, Co y Fe entre ambos laboratorios fueron pequeñas y aceptables.

Entre el 1998 y el 2001 se realizan trabajos de prospección que posibilitaron una caracterización más detallada de estas lateritas y por tanto, elevar el conocimiento geológico del yacimiento. Estos trabajos fueron realizados por la compañía San Felipe Mining Ltd³ y en los cuales participaron un grupo de geólogos, entre ellos: Francisco Formell Cortina, Rosa M. Cobas Botey, Rey Ravelo Lescaille, Victoria González, Leovigildo Baryolo, Clinton Rivers, Jose Sena, Carlos Rodríguez, entre otros, realizando una caracterización geológica del depósito desarrollando perforaciones, trabajos mineros, análisis químicos, estudios mineralógicos, etc., no llegando a sistematizar la información geológica de este depósito respondiendo a las exigencias que ya en el mundo se manejaban para definir un modelo geológico descriptivo del mismo.

Formell et al (1998, 1999), como parte de la prospección, realizan trabajos de perforación en el depósito San Felipe, los cuales arrojaron información geológica valiosa que antes no había sido recogida de estas cortezas ferroniquelíferas. Se determinó su carácter arcilloso, la presencia de minerales como nontronitas, nepuita, saponita, etc. Este informe no llega a la elaboración de un modelo geológico descriptivo como actualmente se define, pero sí aporta los datos fundamentales que contribuirán a la elaboración y definición del modelo.

Geominera Geofísica (1998) realizó investigaciones en el depósito San Felipe, en coordinación con San Felipe Mining LTD, donde se corroboró que San Felipe

³ San Felipe Mining LTD: compañía creada entre Geominera S.A. y Malecon Metals para los trabajos de prospección en este depósito.

presenta un perfil de intemperismo que difiere sustancialmente de los perfiles lateríticos del Oriente de Cuba. Se utilizó el método Polo-dipolo representado por los pseudo cortes de resistividad y cargabilidad, se muestra el horizonte limonítico y la presencia de coraza de Fe por los altos valores de resistividad. Todos los horizontes están representados por la resistividad y la cargabilidad por lo que se diferencia el horizonte limonítico del saprolítico muy claramente, la frontera saprolítica serpentinitica y las peridotitas serpentinizadas.

Rodríguez et al (2001) a partir de la información recopilada desde el 1998 elaboran un Reporte final sub-fase prospección San Felipe (Inglés). En este se confirma el potencial de recursos de Ni para llevar a cabo operaciones, con costos competitivos de producción de Ni, por un período de 25 años. Los estudios de prospección fueron avanzados hasta el estudio conceptual de factibilidad.

Cabrera et al (2005) realizan el estudio comparativo de la composición sustancial mineralógica de muestras tecnológicas del yacimiento San Felipe. Este trabajo se realiza sobre la base de análisis petro-mineralógicos, granulométricos y de fases, lo cual permitió profundizar en el conocimiento de las características mineralógicas y la distribución granulométrica de los principales minerales portadores de Ni en los diferentes sectores del depósito. Este estudio dio como resultado los cambios sustanciales en la composición mineralógica de las diferentes muestras tecnológicas, se han despejado algunas incógnitas en cuanto a los minerales portadores de níquel así como el hallazgo en Cuba del mineral ernieniquelita⁴

En el año 2002 se elabora el reporte Project Concept Study Nickel Laterite de San Felipe con una compilación de toda la información de los trabajos realizados por Geominera S.A. y San Felipe Mining LTD y se mostró que San Felipe es uno de los más importantes recursos niquelíferos no explotados de Cuba. En este trabajo se realiza una caracterización mineralógica definiendo la mineralogía del

⁴ Ernieniquelita: mineral de manganeso ($\text{NiMn}_3\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

basamento en el que aparecen gabros y peridotitas, la mineralogía de las saprolitas, predominando las esmectitas (nontronitas, cloritas), chamosita, serpentinas ricas en Mg y en las limonitas óxidos e hidróxidos de Fe amorfo, maghemita, goethita, óxidos e hidróxidos de Mn, sílice libre y ópalo confirmándose así lo planteado por Formell et al (1998, 1999), sobre la característica específica de este depósito, su carácter arcilloso, representado por esmectitas (nontronita, nepuita, saponita) y la abundante presencia de sílice libre de origen hipergénico en forma de ópalos, calcedonias de diferentes coloraciones y de la presencia de sílice libre pulverulenta (marshalita⁵).

Cobas (2007) elabora el Modelo Geológico del depósito San Felipe sistematizando la información, demostrando que este posee características exclusivas, comparándolo, con los ampliamente desarrollados en la región oriental de Cuba y clasificando su modelo como Saprolítico-Laterítico de Ni y Co. La abundante presencia de la sílice libre y química determinada en el laboratorio es incomparable con otros yacimientos de níquel cubanos e incluso mundiales, sus contenidos de hierro son bajos y el magnesio es también elevado.

Gallardo et al (2011) realizan un estudio empleando diferentes técnicas de análisis como Difracción de Rayos X (DRX) tanto de muestras en polvo como de agregados orientados (AO, AO+EG, AO+550 °C), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS) y de Transmisión (TEM-AEM), confirmándose que la zona mineral está dominada por minerales del grupo de la esmectita y en menor proporción por lizardita y maghemita. La composición de las esmectitas presenta una variación composicional muy similar a las de Murrin Murrin, similar a las de descrita como dioctaédricas (Fe-nontronita). Las esmectitas de mayor profundidad presentan un enriquecimiento en magnesio hasta llegar a unas esmectitas trioctaédricas (saponita), confirmándose lo planteado en las investigaciones realizadas por Formell et al (1998, 1999).

⁵ Marshalita: término muy utilizado para las cortezas de intemperismo por los prospectores e investigadores cubanos, introducido de la escuela rusa. Es una sílice pulverulenta de granos finos, arenosa.

1.1.2. Modelos geológicos

El Programa de Modelación de Yacimientos se inició en 1983 con la finalidad de promover técnicas de avanzada en la exploración y evaluación de los recursos minerales para apoyar el desarrollo sostenible de los países en desarrollo. Este es un programa conjunto de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Los esquemas conceptuales de depósitos minerales han existido desde el momento en que el hombre se dedicó al descubrimiento de nuevas fuentes de recursos minerales Barton (1993). De acuerdo con Cox y Singer (1986) *“un modelo de depósito mineral es un ordenamiento sistemático de información que describe ciertas o todas las características esenciales de un evento particular o fenómeno”*, siendo una de las herramientas disponibles más poderosas para comprender y conocer la localización espacial de los depósitos minerales y dónde se podrían encontrar otros similares.

Un modelo de depósitos minerales es la presentación de la información en una disposición sistemática que describe los atributos (características) esenciales de una clase de depósito de mineral. El modelo puede ser: empírico (descriptivo), en cual caso los varios atributos se reconocen ser esenciales aunque sus relaciones no son conocidas; o puede ser teórico (genético), en cual caso los atributos se correlacionan por medio de un concepto fundamental. No existe un modelo de depósito único aplicable universalmente.

Cox y Singer (1986), fundamentan la elaboración de sus 39 modelos por la clasificación litotectónica, identificaron 16 ambientes geológicos, con varios sub-tipos. Los depósitos residuales fueron clasificados como sigue:

Tabla 1.1.2.1. Modelos de depósitos minerales residuales. Cox y Singer (1993).

Número de Modelo del USGS ⁶	Tipo de Depósito
38a	Laterítico de Ni
38b	Bauxita, tipo laterita
38c	Bauxita, tipo carso
37a	Discordancia de U-Au

La British Columbia en el 2010, publicó su lista maestra de modelos, que cubre toda la clasificación de depósitos minerales que se muestra a continuación:

- A – Orgánico (organic)
- B - Residual/Superficial
- C - Placer
- D – Sedimentos continentales y volcánicos (continental sediments and volcanics)
- E – Sedimentos depositados (sediment-hosted)
- F – Sedimento químico (chemical sediment)
- G – Asociación volcánica marina (marine volcanic association)
- H – Epitermal (Epithermal)
- I – Vena, brecha y stockwork (vein, breccia and stockwork)
- J - Manto
- K - Skarn
- L – Porfiros (porphyry)
- M – Ultramáficas / máficas (ultramafic / mafic)
- N – Carbonatitas (carbonatites)
- O – Pegmatitas (pegmatite)
- P – Metamórfico depositado (metamorphic-hosted)
- Q –Gemas y piedras semipreciosas (gems and semi-precious stones)
- R – Rocas industriales (Industrial Rocks)
- S – Otros

Dentro de los depósitos residuales superficiales se encuentran definidos los modelos según el Servicio Geológico de Estados Unidos y del Servicio Geológico

⁶ United State Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)
Tesis Doctoral

de la Columbia Británica en Canadá (BCGS⁷) como se muestra en la tabla 1.1.3.2. Se encuentran los tipos, sinónimos aproximados y números de los depósitos minerales y depósitos ejemplo del USGS y de la BCGS.

Tabla 1.1.2.2: Tabla de modelos geológicos de BCGS y del USGS.

Modelos BCGS	Tipo de depósito	Sinónimo aproximado	Modelos USGS
B01*	Laterita Fe	Gossan Fe	-
B02*	Laterita Ni	- -	38a
B03*	Laterita-saprolita Au	Placeres eluviales	38g
B04*	Bauxita Al	Laterítico de bauxita	38b
B05	Caolín residual	Primario de caolín	38h*
B07*	Pantano (bog) Fe, Mn, U, Cu, Au	-	-
B08	Superficial de U	Calcreta U	-
B09*	Depositado en carso Fe, Al, Pb-Zn	-	-
B10	Gossan Au-Ag	Residual Au; Metal precioso gossans	-
B11*	Marga	-	-
B12	Arena y grava	-	-

Nota: El número de modelo de depósito que posee un asterisco no tienen ningún modelo del depósito publicado hasta después de los 90.

Un factor importante que determina la decisión de elaboración de este modelo es que no existe en Cuba otro depósito similar, aunque conocemos la existencia de otros con características parecidas en el mundo, pero en general con escasa distribución.

Cobas et al. (1998) realizan el primer trabajo en Cuba sobre modelos geológicos, el mismo consistió en una propuesta de modelos geológicos típicos y atípicos de los yacimientos lateríticos cubanos desarrollados en las ofiolitas orientales. Para la generalización se tomaron como base los datos litológicos, mineralógicos y químicos; nunca llegó a ser estrictamente un modelo geológico descriptivo.

La propuesta de desarrollar la modelación de yacimientos a partir de la información existente en Cuba, su análisis, procesamiento, generalización y transformación, en una primera etapa, en modelos descriptivos de yacimientos

⁷ British Columbia Geological Survey. (Servicio Geológico de la Columbia Británica)
Tesis Doctoral

fue iniciada en Cuba por Ariosa en el 2000, como aplicación práctica de la metodología de la modelación de yacimientos donde propuso tres modelos geológicos descriptivos para agrupar los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa en Cuba oriental, pero no realizó ningún modelo de un depósito en específico.

Este trabajo no incluyó las lateritas desarrolladas en otras regiones de Cuba. El modelo Geológico Descriptivo de San Felipe, que se presenta como resultado de esta investigación complementa ese trabajo, ya que este depósito posee características diferentes a los de la región oriental y no era posible incluirlo en los modelos distinguidos en aquel trabajo.

A partir del 2002, en los diferentes trabajos geológicos desarrollados en los depósitos de níquel de la región oriental por los geólogos de la Empresa Geominera de Oriente, en los informes finales, se define un acápite como “Actualización del modelo Geológico”, donde se presenta un marco geológico general, la geología del yacimiento con una clasificación de los diferentes perfiles de intemperismo, la potencialidad menífera y su relación con la geología, etc. Pero en ninguno de los casos se sistematiza la información como se hace en el diseño de los modelos geológicos descriptivos en el mundo, ni de los modelos tonelaje ley, ni siguiendo la estructura de otros modelos utilizados en la evaluación de yacimientos minerales, ejemplo de estas caracterizaciones se muestran en los trabajos de Lavaut et al (2007), Laborda et al (2005), Urra et al (2009).

Moreira et al (2005) sientan un precedente en Cuba, al utilizar los modelos de exploración mineral y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la evaluación del potencial de recursos minerales niquelíferos en el macizo Cajalbana. Como modelo descriptivo a reconocer, utilizaron el modelo de Lavaut et al (2002).

Cobas (2007) elabora una primera versión del modelo geológico del depósito San Felipe, sistematizando la información, exponiendo en el mismo las características

exclusivas de este depósito, clasificando su modelo como Saprolítico-Laterítico de Ni y Co, destacando la abundante presencia de la sílice.

1.2. Materiales y métodos

La realización de las investigaciones geológicas en el depósito de San Felipe se realizaron durante los años 1998 al 2000, por la compañía San Felipe Mining Ltd., donde la autora trabajó como geóloga consultante, lo que le permitió acopiar la información geológica necesaria para confeccionar el modelo geológico descriptivo del depósito San Felipe.

Como metodología de trabajo, se puede hablar de dos etapas de trabajo, una de campo, donde se realizó un volumen considerable de trabajos de perforación, muestreo, documentación, itinerarios geológicos, avance de pozos criollos, estudios hidrogeológicos, estudios mineros, etc.; otra de gabinete para la interpretación de fotos aéreas, se confeccionó el mapa de pendientes, se creó la base de datos de los resultados de los trabajos de campo y sus resultados, así como el procesamiento de todos estos datos.

Posteriormente se determinó la necesidad de sistematizar toda la información recopilada en estos trabajos, la cual se encuentra conservada en la Oficina Nacional de Recursos Minerales y para ello se utilizó la metodología diseñada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos para la confección de Modelos Geológicos Descriptivos. Se conserva en la Oficina Nacional de Recursos Minerales una base de datos donde se incluyen más de 1000 pozos perforados, muestreados cada metro, con 14 820 muestras con determinaciones de Fe, Ni, Co, MgO, Al₂O₃, SiO₂, MnO, Cr₂O₃ por el método de ICP (Plasma Inductivamente Acoplado) y humedad natural durante el proceso de secado de la muestra, ascienden a más de 120 000 resultados químicos, en estudios mineralógicos, geofísicos, minero técnicos, físico mecánicos, hidrogeológicos y de pre factibilidad.

La perforación fue vertical, en redes de 1000x1000 m, 500x200 m, 200x200 m, 100x100 m, 50x50 m y 25x25 m en algunas áreas para estudio de redes. Los pozos perforados (en puntos rojos en la figura 1.2.1) y utilizados para el análisis y la confección del modelo se distribuyen en el depósito como se muestra en la siguiente figura.

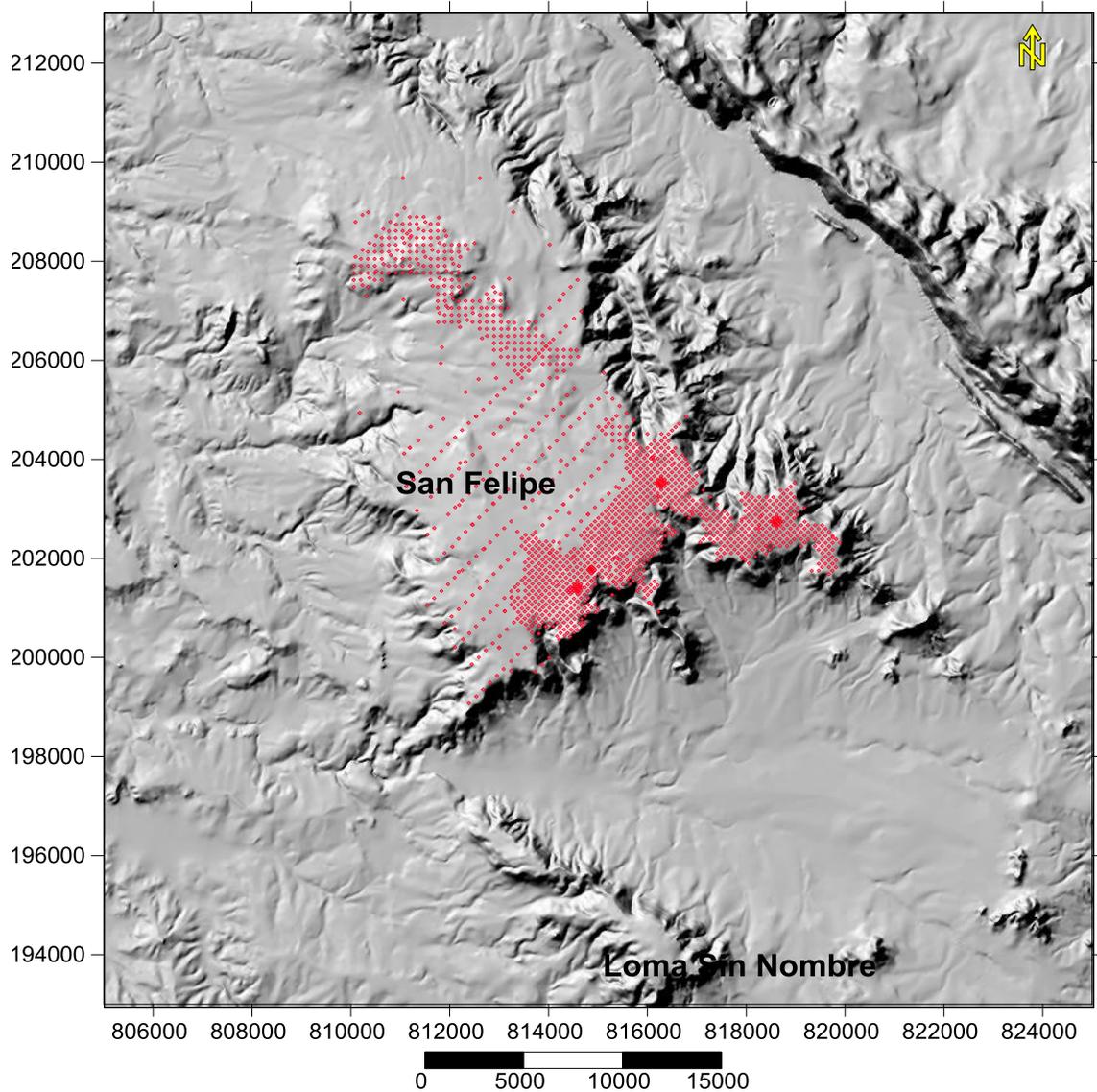


Figura. 1.2.1. Pozos perforados durante la prospección en diferentes redes.

Para el procesamiento de la información se han empleado diferentes soft especializados como el Surfer, el Autocad, ArcGis, otros de uso general como el Access para el manejo de la Base de Datos y el Excel, entre otros.

Este trabajo está basado en la recopilación y procesamiento de datos y de información de tipo descriptiva utilizando varios métodos lo cual fortalece y profundiza la visión integral del depósito, Cruz Baranda (2000), se caracteriza a un objeto o fenómeno “depósito mineral”, mediante la generalización y el análisis de la información geológica de la que se obtendrán las deducciones teórico- prácticas, revelando sus rasgos más significativos, regularidades y tendencias para llegar a caracterizarlo, evaluarlo y por tanto, definir el modelo descriptivo del depósito. El empleo de múltiples métodos científicos y empíricos interconectados para la investigación de fenómenos, incluidos: observación, inducción, deducción, para confirmar lo supuesto, experimentación, descripción, comparación y modelaje, son frecuentemente combinados para entender mejor complejos fenómenos. Se puede hablar de un método imaginativo para la geología. Ríos (1966).

CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS, CLIMÁTICAS Y ECONÓMICAS DE LA REGIÓN

Las características físico geográficas y climáticas de Cuba, como parte del arco insular de las Antillas mayores, están condicionadas por su posición en la zona de interacción de las placas Norteamericana y del Caribe; por su ubicación en el límite septentrional de la zona de bosques tropicales periódicamente húmedos y por la influencia de las oscilaciones paleoclimáticas del Cuaternario.

Por la importancia que revisten las condiciones físicas, geográficas y climáticas de la región para el desarrollo y conservación de los depósitos de cortezas de intemperismo, dedicamos unas líneas para referirnos a las mismas en la región donde se encuentra desarrollado el depósito San Felipe.

2.1. Ubicación geográfica del depósito San Felipe

El depósito San Felipe se ubica en la provincia de Camagüey, la cual ocupa el distrito físico geográfico Camagüey Maniabón. Tiene una superficie de 15 813 Km² (incluyendo el área de los Cayos del Norte), de estos 14 134 Km² pertenecen a tierra firme. Es el terreno llano más extenso de Cuba, se caracteriza por inmensas llanuras y planicies de calizas, rocas vulcanógenas, serpentiniticas e ígneas. A

través de las fallas fluyen las aguas de manantiales, entre ellos los de Camujiro y Tílima.

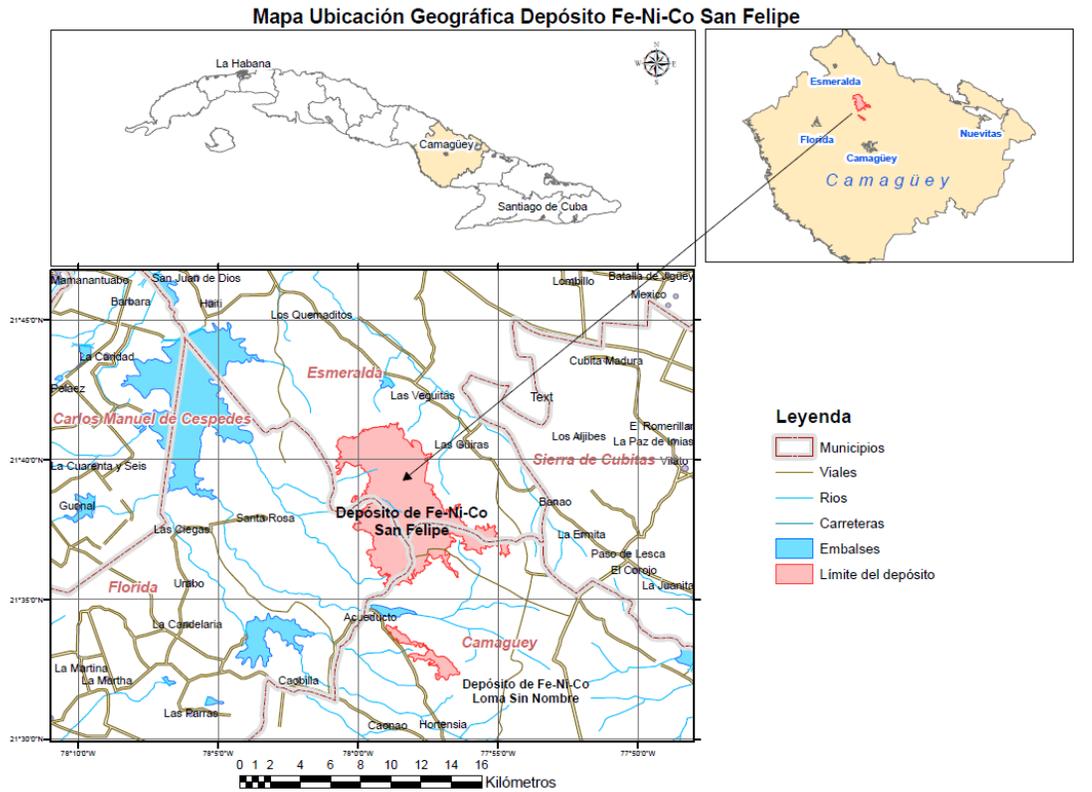


Figura 2.1.1 Ubicación geográfica del depósito San Felipe.

2.2. Relieve

Es fundamentalmente llano y eminentemente diseccionado, con un grupo de elevaciones que se distribuyen de forma aislada. Entre ellas se encuentran:

La Sierra de Cubitas, ubicada en la parte noroccidental de la provincia con una altura máxima de 279 m en el Cerro Tuabaquey, en general está constituida por rocas carbonatadas, las que están muy carsificadas, con presencia de lapies, abras como (El paso de los Paredones y el Paso de Lesca) y dolinas (El Hoyo de Bonet). Presenta laderas de paredes abruptas hacia la parte meridional con pendientes de hasta 85° pero más suaves hacia la ladera septentrional.

La Sierra de Camaján con una altura máxima de 198 m aproximadamente. Se localiza al sureste de la Sierra de Cubitas y presenta una gran complejidad litológica, aunque predominan las calizas y silicitas.

La Sierra de Maraguán situada hacia la parte oriental de la ciudad de Camagüey, con 134 m de altura, compuesta fundamentalmente por calizas y margas.

La meseta de San Felipe se encuentra ubicada dentro de un relieve aplanado, con alturas que oscilan entre 130 y 191 m sobre el nivel del mar aproximadamente.

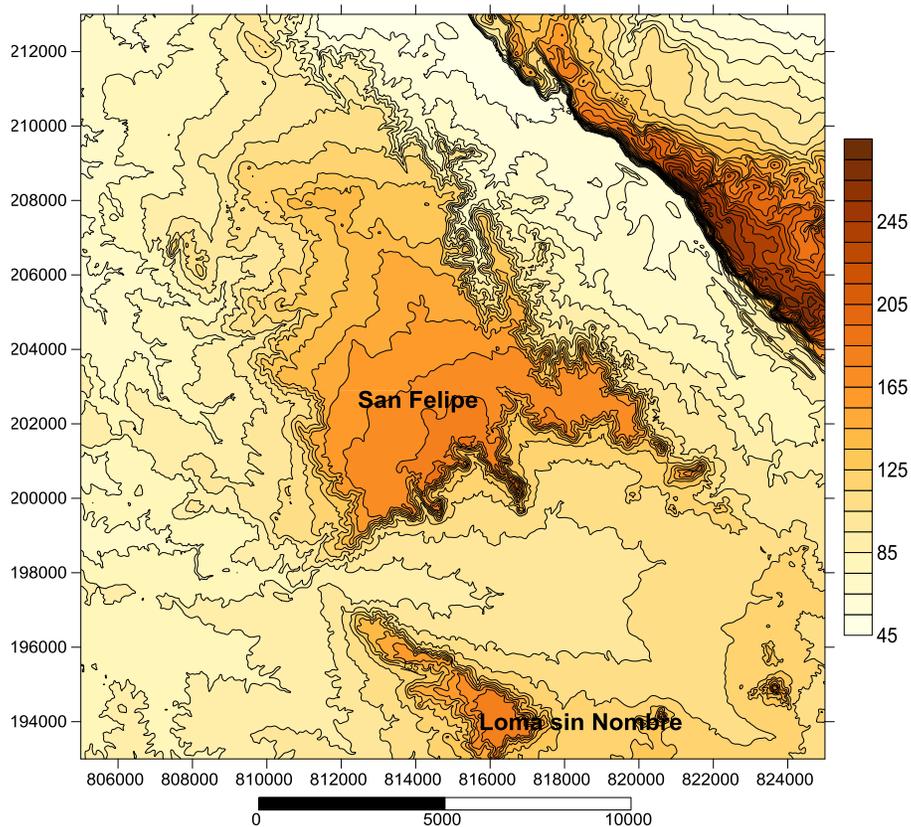


Figura 2.2.1. Mapa hipsométrico San Felipe. Cobas (2016).

2.3. Clima y flora

El clima es típicamente subtropical, con un invierno seco, un verano lluvioso y una época de huracanes que se extiende de junio a noviembre, posee un predominio

de condiciones tropicales marítimas y una distribución estacional de las lluvias. Díaz-Cisnero (1989).

Las temperaturas varían con las estaciones y la altitud, existiendo dos épocas en el año bien definidas, época fresca y seca donde las temperaturas oscilan entre 20 y 25° C, el promedio de mínimas más bajas son en enero con 18.6° C y la época cálida y húmeda donde las temperaturas varían entre 30 y 34° C, el promedio de máximas en agosto es de 33.1° C. La temperatura promedio anual es de 24.7° C.

2.4. Hidrografía

Los ríos de la región son cortos y poco caudalosos, entre los principales se encuentran el Caonao, Saramaguacán, San Pedro, Najasa y Máximo. El sistema de drenaje de la meseta de San Felipe es casi dendrítico comenzando desde el centro de la meseta hacia los bordes a lo largo de pequeños arroyuelos que solo corren durante la época de lluvia. Como un dato adicional se muestran las direcciones de las pendientes las cuales también pueden ser las que controlan el drenaje en general en la meseta y sus alrededores, las que están representadas por un vector con la saeta indicando la dirección del escurrimiento (Figura 2.4.1).

Las fuentes naturales de agua en la meseta son en lo fundamental arroyos intermitentes que nacen allí y mientras corren nutren ríos como el Pontezuela y el Jigüey. El único río en la meseta es el San Felipe, al que se unen dos arroyos intermitentes que tributan al Embalse Porvenir. También existen lagunas, sobre todo en su parte central, estacionalmente inundables.

La profundidad media anual de las aguas subterráneas es menos de 5 m y se presentan rocas acuíferas en distintos grados de caudales de hasta 1 l/s/m. Elías et al (1989). La humedad relativa media anual a las 7 horas es de 90-95 % y a las 13 horas, de 55-60 %, Lecha (1989); mientras que la evaporación media anual es de 1600-1800 mm (Crespo 1989). Tomado de Martínez-Quesada (2010).

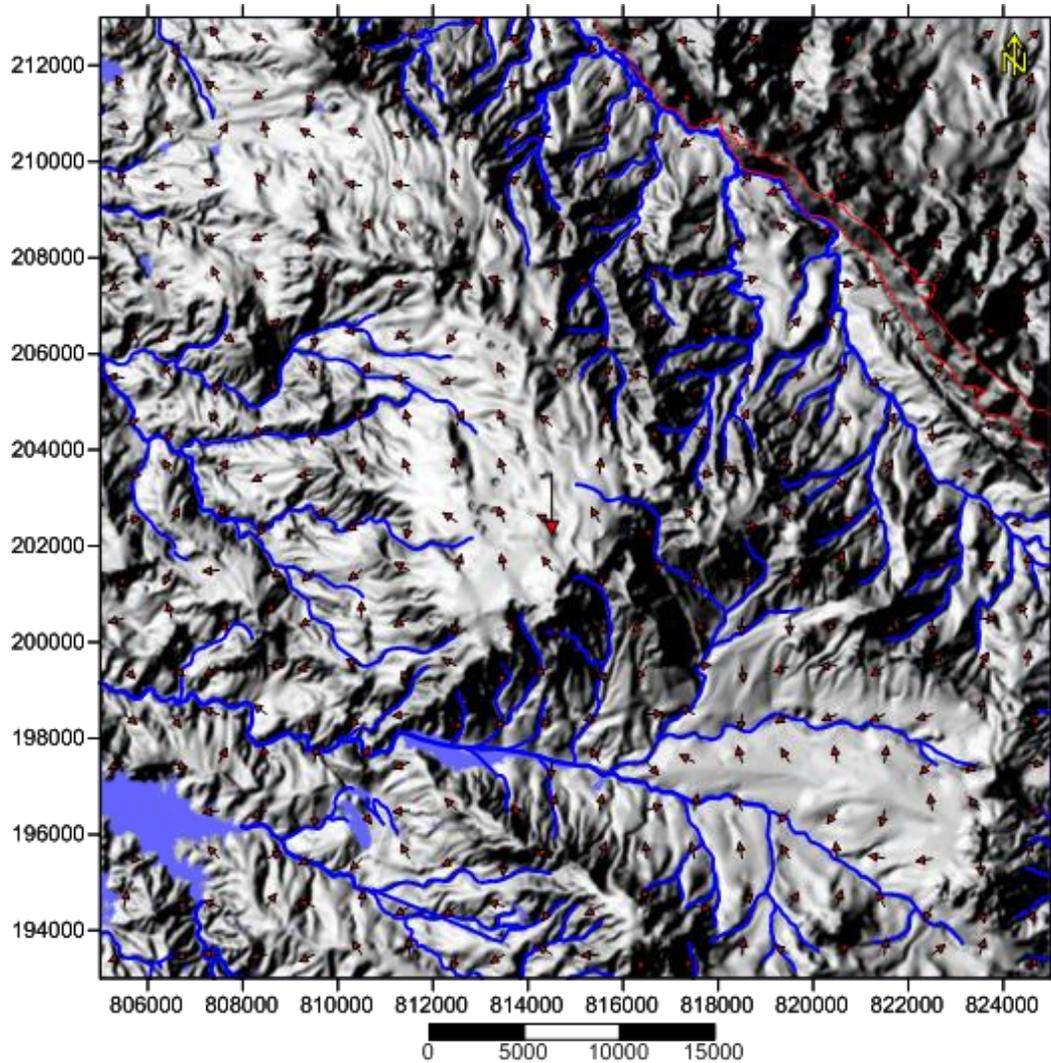


Figura 2.4.1. Red de drenaje de la Meseta de San Felipe. Cobas (2015)

2.5. Economía

Camagüey continúa siendo la principal provincia ganadera de Cuba, que junto con la industria azucarera son los dos principales sostenes de su economía, también posee importantes empresas de crianza equina y bufalina. Cuenta con 125 Km de playas de excepcional calidad, localizadas en el Balneario de Santa Lucía y en un grupo de Cayos adyacentes que constituyen el principal y más atractivo turístico.

La provincia cuenta con poderosas industrias, como la central termoeléctrica Diez de Octubre en la ciudad de Nuevitas y numerosas empresas de materiales de la construcción, tanto en la producción de cemento, de elementos de pisos y prefabricado, hasta canteras, con importantes empresas de la industria metal-mecánica como la Planta Mecánica Ignacio Agramonte y Loynaz, y la de reparación de motores José Smith Comas. Además posee importantes talleres de reparaciones ferroviarias, también se desarrollan actividades mineras relacionadas con la extracción de oro y cromo.

Otro puntal importante en la economía lo constituye la industria alimentaria con factorías destinadas al procesamiento de productos lácteos y la fábrica de cervezas Tímina y la existencia de instituciones científicas vinculadas a la producción como el centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Camagüey cuyas producciones van destinadas fundamentalmente a las esferas agrícola y pecuaria.

En la meseta se encuentra el macizo forestal más importante de la provincia y el tercero en el país, por el volumen de madera acumulado, donde se fomenta la plantación de *pinus caribaea morelet*. La explotación de las plantaciones implica labores forestales que pueden ocasionar pérdida de la diversidad biológica y fragmentación de hábitats, lo que repercute de forma negativa en la estabilidad y mantenimiento in situ de esa diversidad. La flora en la meseta, cuenta con especies endémicas, amenazadas y de distribución restringida. Martínez-Quesada (2010).

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA

No es posible comprender las características geológicas de la región central de Cuba, donde se encuentra situado el depósito de San Felipe, sin entrar en la descripción mas general de la geología de Cuba, toda vez que nuestro país posee regularidades geológicas que trascienden los límites político-administrativos, y al mismo tiempo, son correlacionables entre sí, siguiendo las direcciones estructurales⁸ reconocidas en Cuba, en particular la dirección “cubana” que incluye la mayor faja de rocas de la corteza oceánica sobre la que se desarrollan los mayores yacimientos residuales de la corteza de intemperismo, incluido el depósito San Felipe. Por eso y para una más clara comprensión sobre el entorno geológico en que se desarrolla San Felipe he creído conveniente ofrecer una descripción de las características geológicas del cinturón ofiolítico de Cuba central y oriental.

Las secuencias de las rocas de la corteza oceánica en Cuba están íntimamente relacionadas con la evolución geodinámica del archipiélago cubano. Tanto el volumen de participación en el perfil como el carácter e intensidad de las dislocaciones tectónicas son evidentes testigos que refuerzan la idea de las condiciones cinemáticas que representaron movimientos antihorarios en el Caribe

⁸ Las direcciones estructurales reconocidas en Cuba son: la “cubana” que sigue la dirección estructural del arco volcánico del cretácico y la “caimana” que sigue la dirección estructural del arco volcánico paleógeno.

y una colisión del este al oeste de proto Cuba contra la placa de Norteamérica a partir del Campaniano Superior Maestrichtiano, Formell (2008).

Todos los diferentes tipos litológicos de corteza oceánica en Cuba representan partes de la cuenca oceánica del proto Caribe que se desarrolló entre Norteamérica y Sur América después de la ruptura de Pangea, Pindell (1994); Giunta et al (2002); tomado de Formell (2008)

De acuerdo a las condiciones de su emplazamiento se pueden distinguir las siguientes unidades estructurales ofiolíticas:

- 1.-Ofiolitas del cinturón principal septentrional.
- 2.-Ofiolitas del bloque cortical nororiental
- 3.-Metaofiolitas del macizo del Escambray
- 4.-Metaofiolitas de Güira de Jauco

Las ofiolitas del bloque cortical nororiental incluyen: Las zonas estructuro faciales de Nipe-Cristal y Moa-Baracoa, se diferencian de aquellas del cinturón ofiolítico septentrional por:

- 1.-Un menor grado de serpentización
- 2.-Mayores espesores de los macizos rocosos
- 3.-Corte más profundo de la corteza oceánica
- 4.-Las ofiolitas aquí cabalgan al arco volcánico J-K mientras que en el COS las rocas del AVJ-K cabalgan a las ofiolitas.
- 5.- Máxima participación en el corte de erosión con relación a las restantes zonas del complejo ofiolítico septentrional.

Los depósitos de la corteza de intemperismo ferroniquelífera desarrollados en Cuba, los mayores, se ubican en el bloque cortical nororiental (BCNO), pero

dentro del cinturón ofiolítico septentrional (COS) se desarrolla el depósito de San Felipe, el cual posee características especiales y una historia de desarrollo compleja que lo distingue de aquellos del bloque cortical nororiental. Para comprender mejor las individualidades de San Felipe, es necesario conocer las diferencias geológicas esenciales que existen entre las ofiolitas del bloque nororiental y las del cinturón septentrional, donde se desarrolla San Felipe, porque esas diferencias geológicas iniciales determinaron, en gran medida, las características de las cortezas de intemperismo que se desarrollaron posteriormente en ambas regiones.

Las ofiolitas del bloque nororiental son parte de un corte más profundo de la corteza oceánica y están menos serpentinizadas, por tanto son más sensibles frente a los procesos de intemperismo, mientras que aquellas del cinturón ofiolítico septentrional representan un corte más superficial de la corteza oceánica con presencia de rocas del manto, de la zona de los diques paralelos y de la zona de las vulcanitas de almohadilla y presentan a intervalos un mayor grado de serpentización por la intensidad de los procesos tectónicos ocurridos aunque aquellas que conforman el bloque de Camagüey y en particular el sustrato de San Felipe, siendo este, una cuña tectónica, tiene un núcleo muy poco serpentizado, lo cual favoreció la formación de una potente corteza de intemperismo de tipo manto, que fue en su mayor parte, posteriormente erodada quedando San Felipe, después de una inversión del relieve por erosión como una meseta relicto tipo horst, Formell (2008).

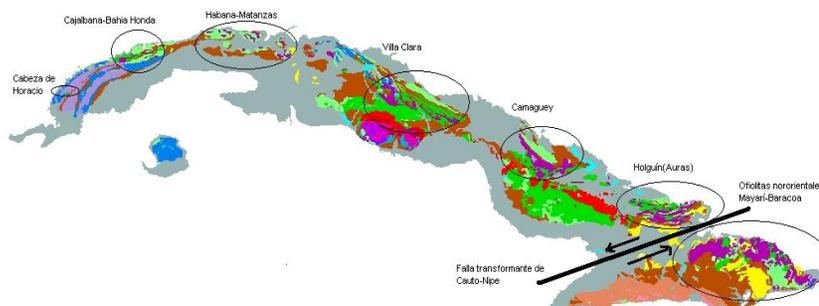


Figura 3.1.1. Esquema de distribución de las ofiolitas en Cuba.

Las ofiolitas en el bloque Camagüey tienen una composición predominantemente harzburgítica y subordinadamente se encuentran también wherlitas, websteritas y dunitas. La sutura principal ofiolítica separa la región miogeosinclinal del norte, de las estructuras del arco insular mesozoico tardío, situadas inmediatamente al sur de la misma. En la composición de este elemento estructural entra la zona de sutura propiamente dicha y una zona de alóctonos ofiolíticos, exprimidos de ella y sobrecorridos hacia el miogeosinclinal (fragmentos de la corteza oceánica tardía), comprimidos como resultado de la colisión del arco insular mesozoico con el cratón norteamericano.

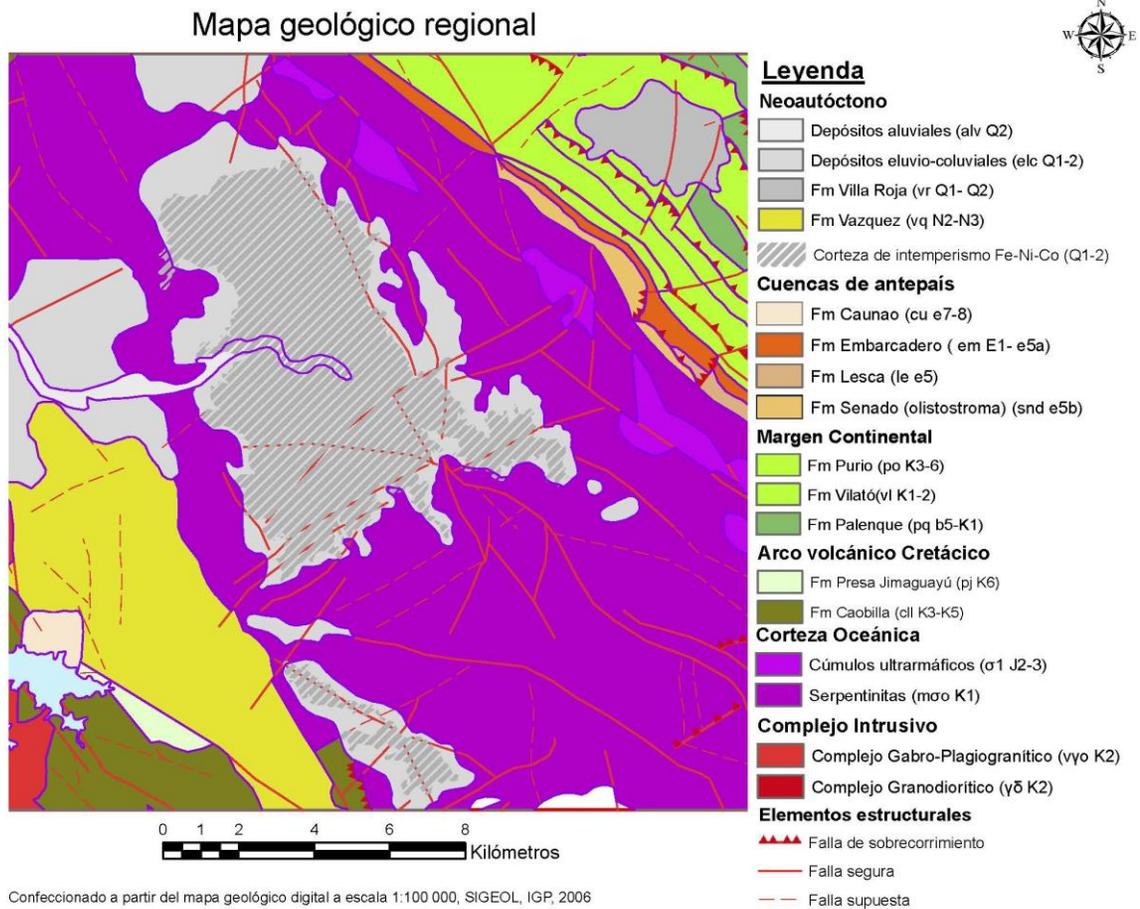


Figura 3.1.2. Mapa geológico de la región, Arias y Cobas (2016), inédito.

Los alóctonos ofiolíticos representan, según sus relaciones morfológicas, un sistema de cuerpos sinformes, planos, estratificados en una serie de escamas y

bloques, cuya potencia total de acuerdo con los resultados de la perforación y los datos geofísicos no supera los 4 Km.

El corte de las escamas y bloques ofiolíticos se caracteriza por una secuencia típica para estas formaciones, según la yacencia de las rocas.

Según los datos de Knipper (1975), Kantchev et al (1978) y Fonseca et al (1985), tomado de Formell (2008), la base de corte está formada por dunitas y harzburgitas serpentinizadas frecuentemente en forma de melange con diferentes grados de desarrollo y una potencia de 1 000 - 2 000 m.

En Camagüey, donde el grado de tectonización es menor, se puede observar su carácter estratificado. En los límites de la zona radical de las ofiolitas (zona de sutura), en las ultrabasitas, se destacan una gran cantidad de bloques e inclusiones tectónicas más pequeñas de rocas metamórficas de carácter melanocrático predominante, en particular, anfibolitas y eclogitas granatíferas.

Las partes superiores del corte de las escamas ofiolíticas están constituidas por los gabros olivínicos tectonizados. Las anortositas, las troctolitas y los gabros anfibólicos (con una potencia de 100 - 1 000 m). Después viene el complejo de diques paralelos (con una potencia de 700 - 1 500 m), el cual pasa gradualmente a variolitas con forma de almohada, espilitas y diabasas con escamas de capas de rocas silíceas y argilitas (de una potencia hasta 600 m). El depósito San Felipe se ubica sobre un bloque de tipo horst en una de las escamas tectónicas de ultrabasitas del bloque Camagüey.

3.1. Geología de depósitos de cortezas de intemperismo

La corteza de intemperismo constituye una formación geológica continental independiente, generada bajo la acción de la energía de los agentes atmosféricos líquidos, gaseosos y biogénicos sobre las rocas primarias, con una textura, una

estructura, una composición mineral y química propias, que contienen yacimientos de minerales característicos, Smirnov (1982).

La acumulación de los componentes útiles en la corteza de intemperismo puede ocurrir de dos maneras principales:

1. Disolución y extracción por las aguas de los principales componentes formadores de rocas y la consecuente acumulación residual de los componentes útiles.
2. Ulterior disolución de los componentes meníferos, su migración y su precipitación en las partes inferiores de la corteza de intemperismo conduciendo a la formación de yacimientos de infiltración.

En muchos casos ambos procesos transcurren simultáneamente y conducen a la formación de yacimientos complejos que poseen una estructura zonal. Según la forma y las condiciones de localización de los cuerpos minerales útiles, entre los yacimientos de corteza de intemperismo se distinguen tres variedades: de manto, lineales y cercanos al contacto.

El depósito San Felipe, al igual que los depósitos desarrollados en otras regiones en Cuba es de tipo residual de manto, con cotas que oscilan entre los 130.3 y 191.2 metros sobre el nivel del mar y se extiende por 48.79 Km². Tiene una morfología compleja, con una transición gradual de las lateritas a esmectitas, a rocas lixiviadas, después fracturadas y no alteradas y roca fresca, cuya superficie es irregular. En el interior de la corteza de intemperismo existen ventanas de rocas no alteradas por la presencia de sílice en estas, que las han hecho resistentes al intemperismo. Aparece en todos los horizontes la sílice libre de manera abundante, sin una regularidad en su distribución.

Los agentes principales que producen la transformación de las rocas en la corteza de intemperismo son: el agua, el oxígeno, el ácido carbónico, ácidos orgánicos y las variaciones de la temperatura. El agua es el agente más activo porque permite

la solución, el traslado y la deposición de los compuestos químicos naturales, la solución de agentes sólidos, líquidos y gaseosos agresivos (el oxígeno, el ácido carbónico, ácidos orgánicos y otros) y su transporte a las áreas de interacción con las rocas; la descomposición de los minerales formadores de mena de la roca madre durante la hidratación e hidrólisis; la regulación de las condiciones físico-químicas de los procesos de transformación de las rocas en la corteza de intemperismo, condicionada por la variación de su acidez-alcalinidad, el potencial de oxidación-reducción (Eh) y la composición química de las sustancias disueltas en ella, Smirnov (1982), Freyssinet (2015) .

Las aguas meteóricas son la fuente principal de agua que actúa en la formación de la corteza de intemperismo, son las precipitaciones que se infiltran hasta las profundidades de la tierra. Durante la circulación subterránea, el agua pasa por 3 zonas: de aeración o de percolación; de saturación completa en un intercambio de agua activo; de saturación completa con un intercambio de agua pasivo (zona de estancamiento). Las reacciones más activas se dan en la zona de aeración, el límite inferior de esta zona coincide con el nivel de las aguas subterráneas, por debajo del nivel de las aguas se halla la zona de la saturación completa con agua, con un intercambio o transferencia de aguas activo, que asegura la llegada del agua de la zona de aeración y su descarga bajo la influencia de la red hidrográfica local, hacia abajo esta zona se convierte gradualmente en la de saturación completa con un intercambio de aguas pasivo, con un traslado muy lento de la masa de agua y de sustancias disueltas en ella hacia los focos de descarga regionales distantes.

El oxígeno juega el papel principal en las reacciones de oxidación, el ácido carbónico participa activamente en los procesos de oxidación y transforma ciertos silicatos en compuestos carbonatados, los ácidos de una composición inorgánica y orgánica intensifican el proceso de descomposición de las rocas, dándoles una orientación química determinada, los organismos intensifican el proceso de la

transformación de las rocas durante el intemperismo y le dan una orientación bioquímica específica.

En la descomposición de la roca primaria tienen una gran importancia las reacciones de hidratación, lixiviación, hidrólisis y oxidación.

En condiciones de una transferencia de las aguas intensa, desaparecen las zonas intermedias, se desarrolla una corteza de intemperismo madura, formándose la corteza de perfil abreviado representada por la zona de hidrólisis final y oxidación.

En condiciones que retardan el desarrollo de la alteración de las rocas primarias, o cuando la transferencia de las aguas es demasiado intensa, el intemperismo puede detenerse en los estadios intermedios del desarrollo, surgiendo la corteza de perfil incompleto compuesta solo por productos de la hidratación y la hidrólisis inicial.

Durante la descomposición de los silicatos y aluminosilicatos de las rocas primarias, se libera la sílice que pasa a la solución en forma de hidrato o silicato alcalino. La solubilidad de la sílice aumenta gradualmente a medida que se pasa de las soluciones ácidas a las alcalinas, acrecentándose bruscamente cuando el pH es de 9-10. En las cortezas de intemperismo, que se forman en un clima cálido, se da una migración apreciable del silicio que se extrae del sistema en las soluciones alcalinas, en otras condiciones, el silicio se deposita en el lugar. La redeposición de la sílice se realiza principalmente en dos formas:

1. Como cuarzo, ópalo y calcedonia, a veces con la formación de sectores silicificados de la corteza.
2. En forma de compuestos aluminosilícicos y ferrosilícicos.

En estos casos la corteza de intemperismo puede enriquecerse con silicio.

El hierro (Fe) pertenece a los elementos de migración débil. Se encuentra en los minerales formadores de menas y accesorios primarios. Durante la formación de

ellos, el Fe se acumula en forma de hidratos, óxidos o hidróxidos. El grueso del Fe se acumula en los productos residuales de sectores superiores de la corteza. El manganeso también pertenece a los elementos de migración débil. Todos sus compuestos primarios se oxidan pasando a los hidróxidos con el Mn (manganeso) tri y tetravalente.

Estas cortezas poseen distintos tipos de perfiles de acuerdo al grado de desarrollo de los procesos de intemperismo que le dieron lugar, así, se encuentran los perfiles completos, abreviados e incompletos, incluso complejos como es el caso del yacimiento de San Felipe. El perfil de la corteza de intemperismo es el resultado de procesos geoquímicos e hidrogeoquímicos siempre en presencia de agua cuyo grado de transferencia (tiempo de interacción con la roca, mineralización y salida del sistema), va a determinar el tipo de perfil resultante.

A la clasificación de los diferentes tipos de perfiles de la corteza de intemperismo se han dedicado numerosos investigadores tanto en Cuba como en el extranjero, pero no siempre las clasificaciones propuestas son lo suficientemente concordantes con la realidad de la naturaleza. En ese sentido debo recordar que el paso de una zona u horizonte en el perfil a otra es gradual y carece de límites bruscos, por lo que la distinción de los horizontes será siempre apreciativa y podrá complicarse o simplificarse todo lo que se quiera. Una clasificación con excesivo detalle, puede, lejos de hacer el perfil más comprensivo hacerlo completamente ininteligible. En la Tabla 3.2.1. se presentan algunas clasificaciones, las más usadas en Cuba y de otros autores, se incluye la zonación geoquímica, la composición mineralógica y las características litológicas de los mismos, así como las especificidades de la clasificación empleadas para el caso de San Felipe.

Tabla 3.2.1. Clasificación de los perfiles de los depósitos de cortezas de intemperismo por diferentes autores.

Zonas Geoquímicas	Zonalidad geoquímica Smirnov	Composición mineral	Características litológicas	Buguel'skiy Y.Y. Formell F.	Lavaut W. EGMO	INCO	San Felipe Formell et al
Zona de los ocre	Zona de hidrólisis final (formación de óxidos e hidróxidos)	Zona de los óxidos e hidróxidos, Goethita, Limonita, hidrohematita, calcedonia, ópalo, pirolusita.	Rocas friables deleznales ocosas de colores rojo - amarillo, marrón que pueden o no conservar relictos de la textura de la roca madre.	Ocres Inestructurales con concreciones de hierro.	Ocres inestructurales con concreciones ferruginosas.	Iron Cap	Ocres no texturales con Concreciones de Fe y bloques de coraza.
				Ocres Estructurales	Ocres inestructurales sin concreciones ferruginosas.	Limonite overburden	Ocres texturales limoníticos Ocres texturales nontroníticos
					Ocres estructurales finales	Limonite Ores	
					Ocres estructurales iniciales.		
Zona de las Nontronitas	Zona hidrólisis y de lixiviación final. Desarrollo de productos arcillosos con hidróxidos de aluminio (gibbsita) Hierro, Manganese. El pH es menor de 5	Zona de los productos Arcillosos del intemperismo. Nontronita, ferrimontmorillonita, caolinita, oxido e hidróxido de Fe, asbolana, calcedonia, opalo, halloysita, cerolita, Saponita, Esmeclitas.	Rocas friables blandas, untosas al tacto, escamadas, cerosas, arcillosas Marrón - verdosas, verdes, amarillo-verdosas que conservan siempre relictos de la textura original.	Nontronitas y ultrabasitas nontronitizadas.		Transition Zone	Serpentinitas nontronitizadas, esmeclitas (Nontronitas, saponita, nepouita, etc.)
						Saprolite	
Zona de lixiviación	Zona de hidratación y de hidrólisis inicial en toda la masa de la roca (de lixiviación profunda) Contiene acumulaciones de nontronita y caolinita. Su pH es de 5-8	Zona de las rocas lixiviadas Minerales de la serpentina, talco, clorita, palygorskita, nepouita, kerolita, nontronita, Serpofita, Ni-Kerolita, kerolita, sepiolita	Rocas friables verde, gris verdosas, con presencia en ocasiones de fragmentos menos intemperizados, conservan relictos de la textura de la roca madre.	Ultrabasitas lixiviadas	Roca madre lixiviada y ligeramente ocretizada	Ore with boulders	Serpentinitas Lixiviadas
						Rocky Ore	
Zona de Hidratación	Zona de hidratación inicial y de lixiviación de las fisuras de las rocas con predominio de la desintegración y la lixiviación.	Zona de rocas débilmente intemperizadas y desintegradas.	Rocas macizas en bloques, agrietadas, con grietas rellenas de silicatos secundarios	Ultrabasitas desintegradas	Roca madre agrietada con mineralización zonal, masiva hipergénicas y filonianas	Fresh rock	Serpentinitas desintegradas

CAPÍTULO 4. MODELO GEOLÓGICO DESCRIPTIVO DEL DEPÓSITO SAN FELIPE

El desarrollo de un modelo geológico de un depósito está sujeto a una enorme gama de incertidumbres, sin mencionar la variabilidad de los sistemas naturales que hacen que cada depósito estudiado sea un caso particular. Actualmente, aunque se acepta que todos los modelos son en uno u otro sentido incompletos, los modelos pasan por rigurosos ensayos que remueven muchos de los temas dogmáticos sobre la formación de la mineralización. Cox et al (1987).

Un modelo geológico es la descripción y explicación del comportamiento de un proceso natural en términos de parámetros o atributos, tales como: la litología, la tectónica, las características geofísicas, la geoquímica, la geomorfología, etc. para así analizar e interpretar este resultado.

Existen dos tipos de modelos:

- Modelo empírico: basado en observaciones prácticas de depósitos minerales (descriptivo, de ocurrencia).
 - Los atributos se reconocen como esenciales, pero sus relaciones se desconocen.
- Modelo conceptual: basado en conceptos teóricos (genético).

- Los atributos están interrelacionados a través de un concepto fundamental.

Los atributos presentados en el modelo geológico descriptivo del depósito San Felipe sirven como guía para las exploraciones futuras más detalladas, para las evaluaciones, la interpretación de los resultados de este depósito y garantizar el desarrollo minero sostenible del mismo y la estimación de los recursos.

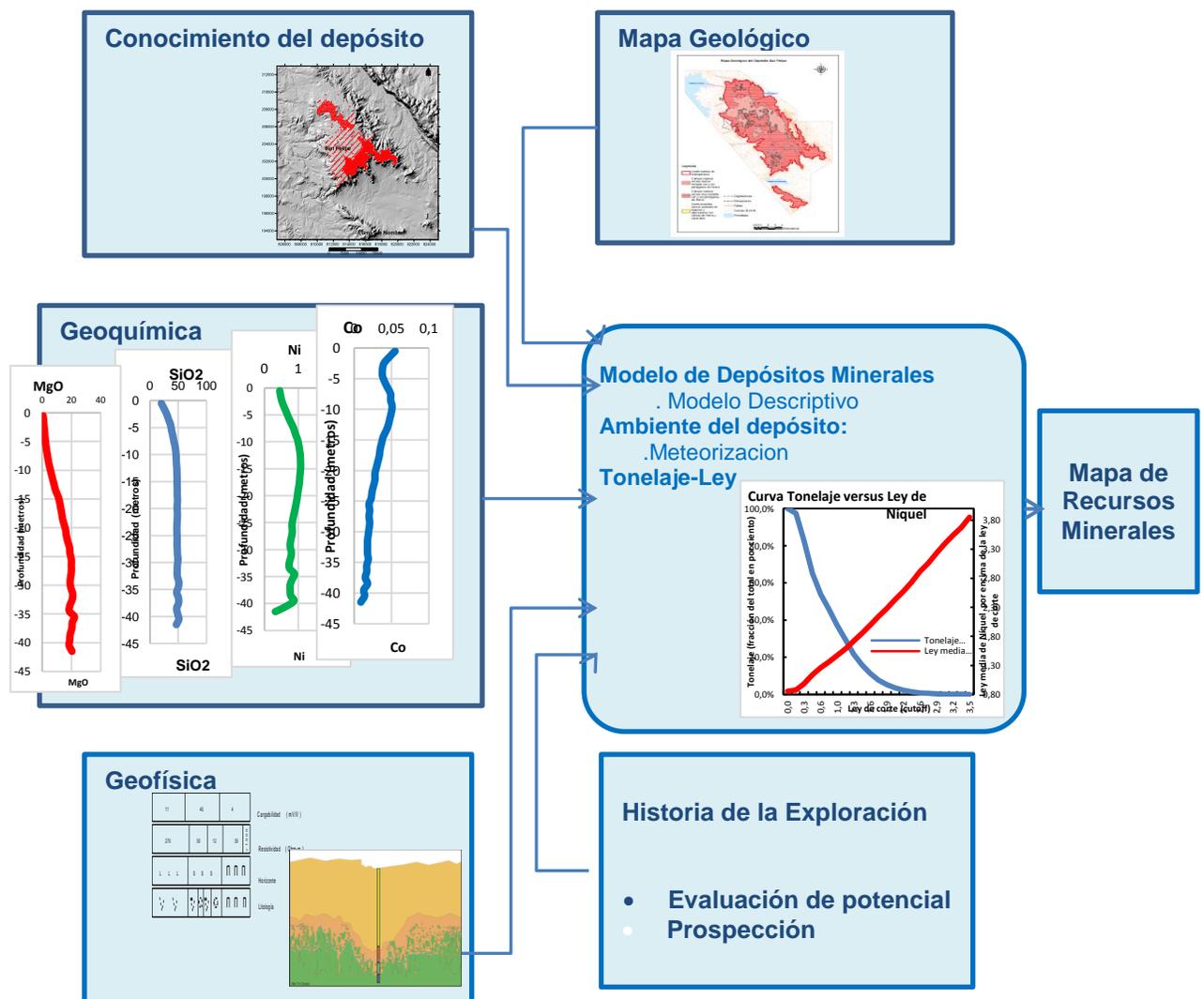


Figura 4.1. Diagrama del modelo del depósito San Felipe. Cobas 2017. Adaptado de Singer (1986).

En la figura 4.1 se muestra el diagrama para la elaboración del modelo geológico descriptivo del depósito con la información sistematizada y recopilada, adaptado de Singer, en el mismo se muestra como la información geológica tributa a la confección del modelo geológico y este a los recursos minerales.

En la figura 4.2 se presenta la composición química fundamental en % del depósito San Felipe y de algunos de los depósitos cubanos de la región oriental los cuales poseen un quimismo con un mayor parecido con San Felipe. Se muestran los elementos Fe, SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃, Mg, Ni x10 (níquel aumentado 10 veces para que se observe la barra), Co x 100 (el cobalto aumentado 100 veces para que se observe la barra).

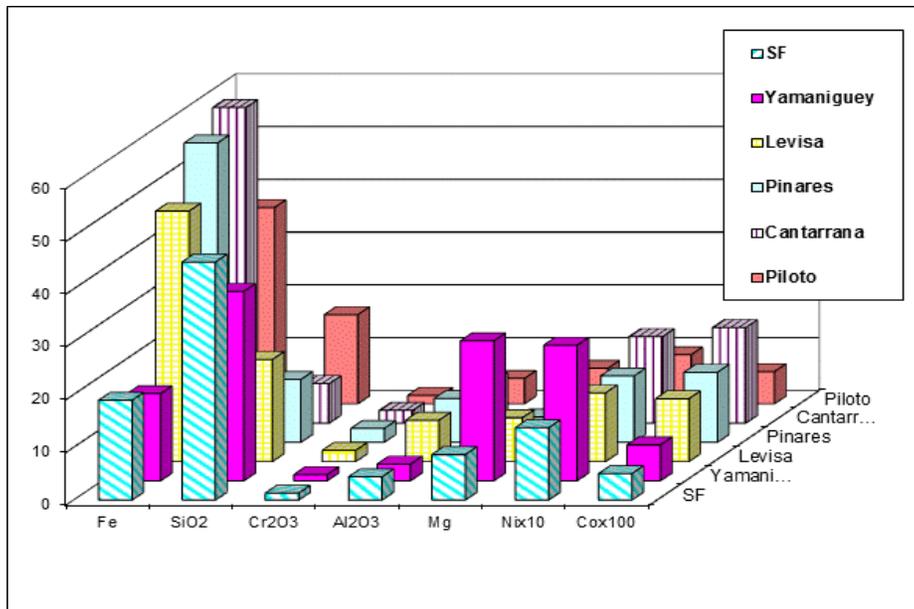


Figura 4.2. Composición química de San Felipe (SF), Yamanigüey Cuerpo I (Yamanigüey), Levisa, Pinares de Mayarí (Pinares), Cantarrana y Piloto.

Se destaca en la figura el elevado valor de la SiO₂, que sobresale de los demás depósitos, incluido Yamanigüey, en el área remanente después de la minería para las limonitas.

Este modelo se confecciona siguiendo el formato para la parte geológica que presentan Marsh et al. (2010) y Marsh y Anderson (2011) del Servicio Geológico

de los Estados Unidos en sus reportes de Investigaciones Científicas 2010-5070-H y el Open-File Report 2011–1259 respectivamente.

La sistematización de la información geológica del depósito San Felipe, posibilitará la clasificación y conocimiento del mismo para su adecuada inclusión en los tipos de modelos geológicos descriptivos de depósitos, pudiéndose así ubicar en los definidos en las rocas de meteorización y concentración residual como un subtipo por su singularidad en la composición mineralógica.

4.1. Tipo de depósitos y materiales asociados

Las cortezas de intemperismo ferro-cobalto-niquelíferas son depósitos supergénicos que se forman solamente en climas tropicales. El hallazgo de depósitos lateríticos en regiones de climas actualmente diferentes es un indicador de la existencia de climas tropicales en la época de formación de aquellos constituyendo un importante indicador paleoclimático. Ejemplos de esto son los depósitos lateríticos de Kimpersay en los Urales del sur.

El tiempo de formación de un depósito laterítico, geológicamente hablando es breve y fluctúa en los primeros millones de años en dependencia de la intensidad del régimen de lluvias y la temperatura media de la región en cuestión, así como de la existencia de condiciones geomorfológicas apropiadas para la conservación de los productos friables que se forman durante estos procesos.

4.1.2. Ejemplos de depósitos

Se conocen en el mundo con similitud a San Felipe, otros depósitos como:

Depósito Shevchenko. Kazakstán

El depósito de menas de níquel arcilloso Shevchenko se encuentra en el Noroeste de Kazakstán. Se desarrolló sobre ofiolitas localizadas en la Zona Trans-uraliana de los Urales, obducidas sobre el continente Kazakh durante la orogenia Urálida y

ulteriormente profundamente intemperizadas en una serie de etapas hasta el Terciario.

Tabla 4.1.2.1. Composición química del depósito Shevchenko

Elementos	Contenido promedios por horizontes en %		
	Limonita	Nontronita	Saprolita
MgO	4.41	9.93	17.6
Al ₂ O ₃	6.87	4.83	3.70
SiO ₂	36.4	46.0	46.5
CaO	1.34	0.92	1.40
Cr ₂ O ₃	1.22	0.97	0.77
MnO	0.51	0.37	0.25
Fe ₂ O ₃	37.6	24.3	17.1
CoO	0.13	0.07	0.04
NiO	1.15	1.34	1.29
CuO	0.02	0.01	0.01
TiO ₂	0.30	0.26	0.20
SiO ₂ /MgO	8.3	4.6	2.6
Fe/SiO ₂	0.722	0.370	0.257
Fe/Ni	32.6	18.2	13.2
Ni/Co	8.9	19.4	30.8

La mineralización de níquel está controlada por arcillas esmectíticas, llevando subordinadamente mineralización de níquel también en los óxidos e hidróxidos de hierro. El intemperismo fue desarrollado de forma variable sobre las serpentinitas, con un control de las diferentes estructuras en profundidad, Alexander et al (2007).

Depósito Murrin Murrin. Australia.

El depósito de menas de níquel arcillosas Murrin Murrin, al oeste de Australia desarrollado sobre las peridotitas serpentinizadas. Su mineralogía está dominada por las serpentinas, esmectitas y maghemita. Las esmectitas están representadas por saponitas y nontronitas con geoquímica intermedia entre dos miembros dioctahedral (Fe nontronita, Fe montmorillonita) y un trioctahedral (Mg+Ni saponita). Las esmectitas y la maghemita son los minerales dominantes y la goethita aparece en la zona superior. Para estos estudios se empleó la microscopía óptica, XRD, SEM y TEM-EDX, Gaudin et al (2005).

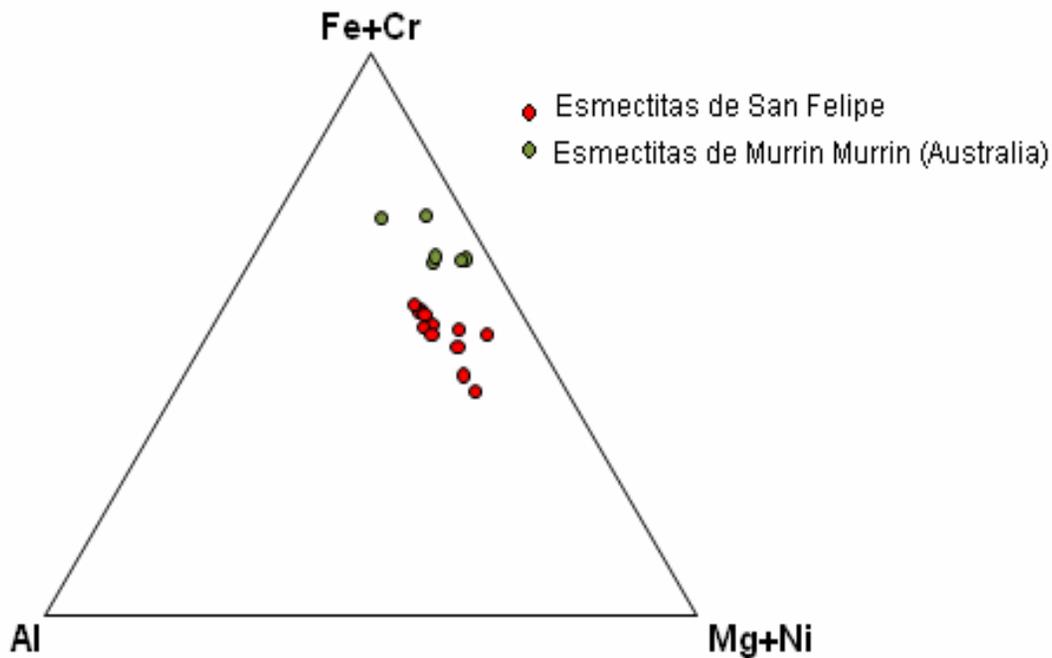


Figura 4.1.2.1 Diagrama ternario Al/(Mg,Ni)/(Fe,Cr) con los datos de TEM-AEM de las esmectitas de San Felipe y de Murrin Murrin, Gaudin et al (2003).

4.2. Evolución histórica del conocimiento descriptivo, genético y conceptual.

La aplicación del término laterita fue definido inicialmente por Buchanan (1807), derivado de la palabra latina later y fue utilizado para describir la arcilla endurecida de la India, describiéndola como la parte de un perfil del intemperismo producido por la acción de diferentes factores atmosféricos y desde entonces, se comienza a utilizar la expresión perfil laterítico indicando el fenómeno de lateritización. Los perfiles de lateritas se han descrito en muchas regiones tropicales del mundo. Luego fue definida de forma similar por Jutson (1914); Walther (1915, 1916) y Anand et al (1997).

Las lateritas níquelíferas y cobaltíferas son producto del intenso proceso de intemperismo químico físico que actúa sobre rocas ultramáficas, principalmente, peridotitas, dunitas y su serpentización equivalente. El níquel se deriva

principalmente del olivino forsterita ($> Fo_{75}$), que contiene comúnmente 0.16 - 0.40 % Ni.

El depósito de San Felipe se menciona por primera vez por Spencer en el 1907, posteriormente en la década de los 80, durante el levantamiento 1:50 000 realizado por una brigada cubano alemana, el área de San Felipe, por su extensión y sus características geológicas es escogida para prospectar, elevando consecuentemente, el conocimiento geológico de la misma. Se realizó un estudio de su geoquímica, mineralogía, así como se estimaron sus recursos. En la década del 90, la compañía Western Mining realiza una comprobación de la información ya existente en ese momento sobre el depósito y posteriormente, a finales de la década, (1998) la compañía San Felipe Mining Ltd., solicita la concesión de investigación geológica, con el fin de comprobar lo ya reportado por los estudios anteriores y realizar las precisiones necesarias para una futura inversión de una planta para la extracción de Ni. Es durante estos estudios donde se reporta con precisión la presencia y el control de la mineralización fundamentalmente por las arcillas esmectíticas, identificadas en el campo como nontronitas principalmente, nepuita, saponita, Formell et al (1998).

Las muestras mineralógicas seleccionadas y enviadas al laboratorio del Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), en La Habana, Cuba y sus análisis, corroboran la existencia de estas arcillas y por supuesto el carácter arcilloso de las menas del depósito. Estos trabajos de prospección culminaron con una estimación de recursos, un estudio tecnológico y un estudio conceptual de factibilidad en la década del 2000.

La corteza de intemperismo desarrollada en San Felipe se encuentra sobre rocas ultramáficas, a lo largo y ancho de la parte aplanada de la meseta, elevada sobre el nivel del peniplano regional. En la superficie se observan bloques sueltos aislados de coraza de hierro (hardpan, duricrust) con sílice libre, los que aumentan

su presencia y sus contenidos en sílice hacia la periferia, se observan también bloques de ópalos y calcedonias.

El origen de la morfoestructura de San Felipe se asocia a la probable existencia de una antigua corteza de intemperismo que se desarrolló en toda el área del actual peniplano de Camagüey. En el lugar de la actual meseta, aquella corteza de intemperismo se profundizaba formando una corteza de tipo bolsón, por la existencia de zonas de debilidad tectónica que favorecieron la circulación de las aguas subterráneas y con ello la más efectiva consecución de los procesos de intemperismo químico. En este ambiente la sílice y el magnesio extraídos por las aguas agresivas sobresaturadas en sílice y magnesio que circulaban lentamente y con una lenta extracción del sistema eran precipitados en el fondo de la corteza de intemperismo en forma de sílice libre (ópalos y calcedonias) y magnetita rellenando fundamentalmente las grietas prototectónicas y las zonas de fallas de las ultrabasitas.

Durante el Terciario superior se desarrolló una potente corteza de intemperismo laterítica de tipo manto y durante el Terciario tardío-Cuaternario esa corteza de intemperismo fue lavada por una intensa erosión invirtiéndose el relieve y quedando San Felipe y Loma Sin Nombre, como remanentes de erosión, gracias precisamente a la existencia de masas de sílice secundaria que se comportaron como barreras e impidieron la consecución de la erosión en esas áreas.

Esta corteza fue lavada y transportados sus productos friables ocrosos y arcillosos y probablemente redepositados en las concavidades cársicas del terreno carbonatado que se desarrolla al norte de la Sierra de Cubitas, en condiciones paleotectónicas de basculación de bloques que situaron al actual peniplano de Camagüey en condiciones hipsométricas por encima de la Sierra de Cubitas al final del Mioceno Superior, Formell (1979); Formell y Cobas (1998).

En el lugar de la actual meseta de San Felipe, sin embargo, las raíces silíceas de esa corteza permanecieron y sirvieron de barrera a los ulteriores procesos de

erosión regional que ocurrieron, favorecidos también muy probablemente por movimientos de basculación neotectónica ocurridos a través del sistema de fallas de dirección “cubana” las cuales fueron originalmente fallas de sobrecorrimiento, pero se comportaron durante los procesos de rejuvenecimiento neotectónicos esencialmente como fallas verticales.

Ulteriormente, una nueva corteza de intemperismo se desarrolló sobre el antiguo relieve erodado saturado de sílice libre fragmentada y en vetas y vetillas, constituidas por ópalos de varios colores, calcedonias, muy escasamente cuarzo y sílice pulverulenta (marshalita).

Estos eventos de intemperismo múltiple son perfectamente concebibles, teniendo en cuenta el dinamismo que acompaña la formación de las cortezas de intemperismo en condiciones de clima tropical con alternancia de periodos secos y lluviosos, como ha ocurrido en Cuba desde el Mioceno superior – Plioceno hasta el presente, Formell et al (1998). Ejemplos de relictos de raíces de cortezas de intemperismo antiguas erodados se observan también en otros lugares de Cuba, como por ejemplo en San Miguel de los Baños, provincia de Matanzas, Formell (1979).

4.3. Ambiente Regional

Las lateritas ferro cobalto níquelíferas de la meseta de San Felipe se desarrollan en una región de clima tropical, existiendo dos épocas bien definidas, un invierno seco, donde las temperaturas oscilan entre 20 y 25° C y una época cálida y húmeda donde las temperaturas varían entre 30 y 34° C con un promedio anual de 24.7° C. La mínima más baja es de 18.6 ° C, la máxima, en agosto, es de 33.1° C. La precipitación media anual en la región oscila entre 1400 y 1600 mm y la humedad relativa es de 81 %, Díaz (1989); Motito (2013).

Las condiciones geomorfológicas y climáticas facilitan la transferencia de las aguas a una velocidad lenta lo que es una condición imprescindible para el desarrollo de perfiles de intemperismo completos.

4.3.1 Ambiente Geotectónico

En las ofiolitas emplazadas en Camagüey, región central de Cuba es donde se desarrolla el depósito San Felipe, estas ofiolitas presentan una dirección general NW-SE, coincidiendo con la dirección cubana, paralela a la dirección estructural de la falla Cubitas, de la que la separa un valle de tipo graben. Se define como una meseta de tipo horst en una zona de antiguos sobrecorrimientos caracterizada por laderas abruptas al este, oeste y sureste y una ladera que se desarrolla al noroeste y que desciende de forma muy suave hasta alcanzar el nivel del peniplano general. El límite oeste coincide con la falla de sobrecorrimiento que limita el terreno de corteza oceánica del terreno de Arco de Islas Volcánicas el cual cabalga a las ultrabasitas con un ángulo suave que no sobrepasa los 30°, Formell et al (1998).

El depósito San Felipe cubre parte del terreno de corteza oceánica de Camagüey, el cual forma una cuña orientada en dirección NW-SE que ha sido obducida a través de una falla de sobrecorrimiento de bajo ángulo sobre el terreno del margen continental de Norteamérica en el Cretácico superior tardío o el Cenozoico temprano. Ese segmento de la corteza oceánica fue emplazado en la superficie a lo largo de una zona de subducción originalmente de buzamiento sur durante la colisión oblicua siniestral del Arco de Islas volcánico cubano contra el cratón de Norteamérica que resultó en el cierre y sutura de la zona de subducción.

Las rocas de este segmento están generalmente representadas por las tectonitas ultramáficas, los cúmulos máficos, diques paralelos de diabasa y basaltos oceánicos, todos ellos comprendidos en un conjunto tectónico, arqueado e imbricado, de fallas y pliegues de sobrecorrimiento, que rompieron la secuencia estratigráfica normal de la corteza oceánica. No obstante, aún puede reconocerse

una cierta zonalidad en el área de la cuña tectónica, estando las tectonitas ultramáficas principalmente distribuidas en la parte norte y los cúmulos máficos, diques de diabasa y basaltos oceánicos al sur, formando la charnela de un arco convexo hacia el sur.

4.3.2 Relación Temporal

La distribución global de los depósitos lateríticos de Ni – Co es el resultado de la combinación de un protolito ultramáfico expuesto a las condiciones y acción de los factores actuantes por un clima, relieve y tectónica favorables en un ambiente geológico general supergénico.

Debido a que las condiciones climáticas y tectónicas del planeta no siempre fueron las mismas ni en el tiempo ni en el espacio, la formación de las cortezas de intemperismo se desarrolló en forma fluctuante espacio-temporalmente siempre que coexistieron las condiciones necesarias para el desarrollo de las mismas, comenzando solo a partir del primer evento de oxidación planetaria, Rye y Holland (1998).

Estas condiciones de fluctuaciones paleoclimáticas dieron origen a los depósitos formados en condiciones tropicales, alejados actualmente del Ecuador, como son los desarrollados en los Urales y en Oregón, al igual que los depósitos desarrollados en Australia donde se supone que la deriva continental los movió hasta allí desde regiones tropicales a estas nuevas condiciones más áridas. Ejemplos clásicos de este fenómeno se encuentran en los yacimientos de la corteza de intemperismo de los Urales meridionales en el distrito minero de Kimpersay, donde sobresale el yacimiento Shevchenko.

El clima de Cuba es cálido tropical, estacionalmente húmedo, con influencia marítima. Su ubicación geográfica es muy cercana al trópico de Cáncer lo que condiciona la recepción de altos valores de radiación solar y determina el carácter cálido del clima. Sin embargo, Cuba se halla en una posición singular en la frontera entre la zona de circulación tropical y extratropical, recibiendo la influencia

de ambas con carácter estacional. La mayor variabilidad en el clima de Cuba es con las precipitaciones. El acumulado medio anual es de 1335 mm. En la mayor parte del territorio, el año se divide en dos periodos estacionales, el lluvioso (de mayo a octubre) donde se registra aproximadamente el 80 % del total anual y el poco lluvioso (de noviembre a abril) con el 20 % restante.

La humedad relativa es normalmente alta, con valores por encima de 60 %. Los máximos diarios ocurren a la salida del sol (en ocasiones llega a ser superior al 95 %), más elevados en las zonas montañosas y en el interior del país. Los mínimos, al mediodía se ubican en las costas, disminuyendo hasta aproximadamente 60 % en el interior del territorio. <http://www.ecured.cu> (2016).

Evidentemente, estas condiciones del clima en Cuba posibilitaron la formación de las extensas cortezas de intemperismo sobre los macizos de rocas ultramáficas que se desarrollan en diferentes puntos a lo largo de toda la Isla, con diferentes niveles de ocurrencia y con características de las ofiolíticas similares en su composición petrográfica, pero no así en su posición en el relieve.

4.3.3. Duración de procesos de mineralización

La mineralización níquelífera en San Felipe data del Mioceno Superior- plioceno pleistoceno. Esta corteza joven que se observa actualmente en superficie tiene una edad no más antigua que el plioceno y se desarrolla sobre relictos silíceos de una corteza de intemperismo más antigua que fue lavada y erodada. Formell (1979), Formell et al (1998).

La menas en general están constituidas por esmectitas (nontronita, montmorillonita, nepuita, saponita), óxidos e hidróxidos de Fe ricas en trevorita⁹, minerales de serpentina, SiO₂ libre, cloritas así como otros minerales presentes en pequeñas cantidades como la moscovita, cromita, óxidos de Mn con ernieniquelita. Cabrera et al (2005).

⁹ Una espinela Fe – Ni muy semejante a la magnetita, mientras que en los depósitos de Moa son las arcillas ferrosas ricas en nepuita (análoga a la serpentina), Garnierita y Revdinskita, Cabrera et al (2005).

4.3.4. Relación con las estructuras

Las estructuras, fallas y fracturas así como contactos juegan un papel determinante en el desarrollo de los depósitos de cortezas de intemperismo níquelíferos cobaltíferos. Uno de los factores más importantes en la formación de estos depósitos es la permeabilidad de la roca madre, ya que en dependencia de esta habrá mayor facilidad para la circulación de las aguas y de las soluciones encargadas de mover los elementos móviles y facilitar la concentración de los menos móviles.

El origen de la morfoestructura de San Felipe se asocia a la probable existencia de una antigua corteza de intemperismo que se desarrolló en toda el área del actual peniplano de Camagüey. En estas condiciones, como ya se ha señalado, las aguas sobresaturadas en sílice y magnesio que tenían una lenta circulación y una lenta extracción del sistema, precipitaban la sílice y el magnesio rellenando fundamentalmente las grietas prototectónicas y las zonas de fallas de las ultrabasitas.

4.3.5. Relación a las rocas ígneas

Las saprolíticas del depósito San Felipe se desarrollan sobre rocas de la asociación ofiolítica de la parte media de la corteza oceánica con un predominio en lo fundamental de la zona de transición o MTZ compuesto por las peridotitas (harzburgitas, lherzolitas, wherlitas), dunitas y diques de piroxenitas gabros, microgabros, gabro diabasas y diabasas, quedando dentro de la mayoría de los depósitos ferro-cobalto-níquelíferos del mundo. Estas menas son el resultado de la acción del intemperismo químico sobre las rocas ígneas serpentinizadas.

Generalmente, hay dos clases de rocas ultramáficas que pueden producir un depósito económico de lateritas níquelíferas ricas en Ni-Co si están expuestas al intemperismo por la acción atmosférica prolongada: un 85 % son las dunitas, las peridotitas, harzburgitas y wherlitas en secuencias de ofiolitas tipo alpino y en escamas grandes del empuje por obducción de las ofiolitas y un 15 % son las

komatitas dominantes del olivino y las intrusiones acodadas máficas – ultramáficas, que están presentes dentro de muchos escudos precámbricos, Brand et al (1998).

4.4. Descripción física del depósito

El depósito San Felipe, desarrollado sobre las ofiolitas posee morfológicamente más bien forma de cuesta alargada, con una disminución de sus cotas hacia el Noroeste. Se observan zonas de intradepresiones caracterizadas por la presencia de coraza y coraza silicificada. Debido a la abundante humedad en estas zonas por la no salida de las aguas meteóricas del sistema en la época de lluvia, se llegan a formar pequeñas acumulaciones de agua (lagunas).

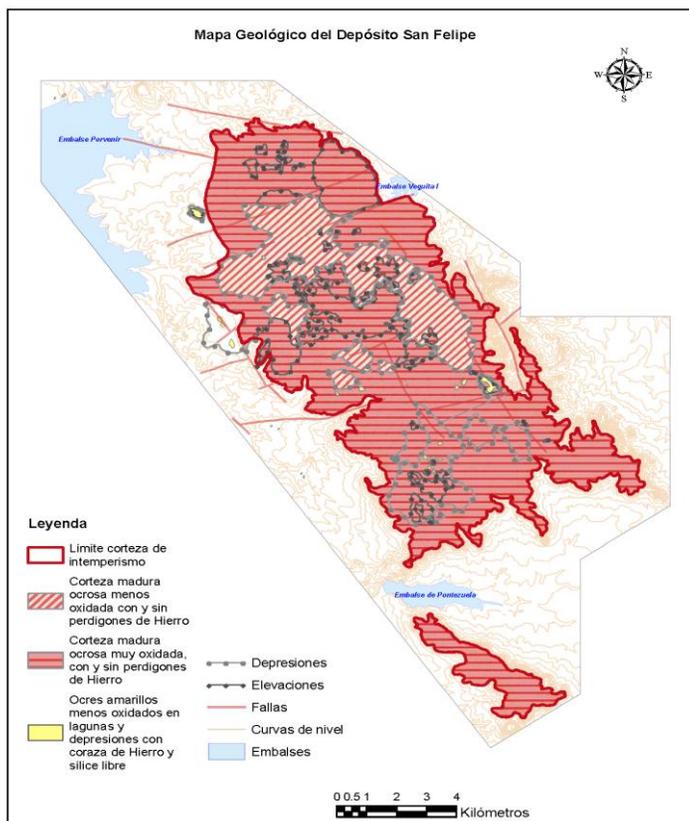


Figura 4.4.1. Mapa geológico (distribución de la corteza de intemperismo) del depósito San Felipe, Cobas y Formell (1999).

La acción combinada de los procesos exógenos y tectónicos determinaron la evolución y las características del perfil de intemperismo que es esencialmente de menas silicatadas arcillosas (nontroníticas). Las condiciones de la transferencia de las aguas muy lentas en San Felipe dio lugar a un perfil muy complejo de la corteza con la participación inusual de la sílice, tanto libre como combinada, resultado de la muy difícil salida del sistema de las aguas altamente mineralizadas, Formell y Cobas (1998).

4.4.1. Dimensiones y vista en planta

La corteza desarrollada sobre las ofiolitas, que constituyen el depósito San Felipe se extiende por 48.798 Km², las potencias de la corteza en la parte sur - sureste ascienden en algunos lugares hasta los 30 m, siendo inferiores en el extremo norte noroeste.

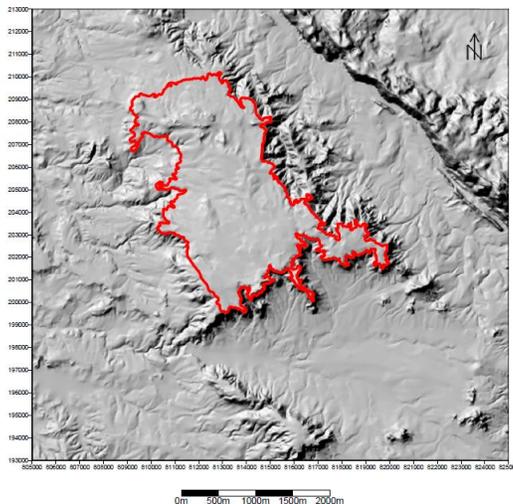


Figura 4.4.1.1. Modelo digital del terreno sombreado y contorno de la corteza de intemperismo de San Felipe.



Figura 4.4.1.2. Foto de San Felipe que muestra la extensión de la corteza de intemperismo.

4.4.2. Extensión vertical y forma

El depósito San Felipe es una corteza de intemperismo tipo manto-bolsón con potencias de sus perfiles que oscilan entre 3 y 43.6 m, con un promedio de 22.7 m. El promedio de la zona mineral, con una ley de corte de 0.8 % de Ni, es de aproximadamente 10 m, con una cubierta o escombros promedio de 8 m (varía de 0

a 15 m), las menas níquelíferas están asociadas a arcillas esmectíticas. La corteza presenta perfiles completos, muy frecuentemente complejos por la inusual presencia de sílice libre.

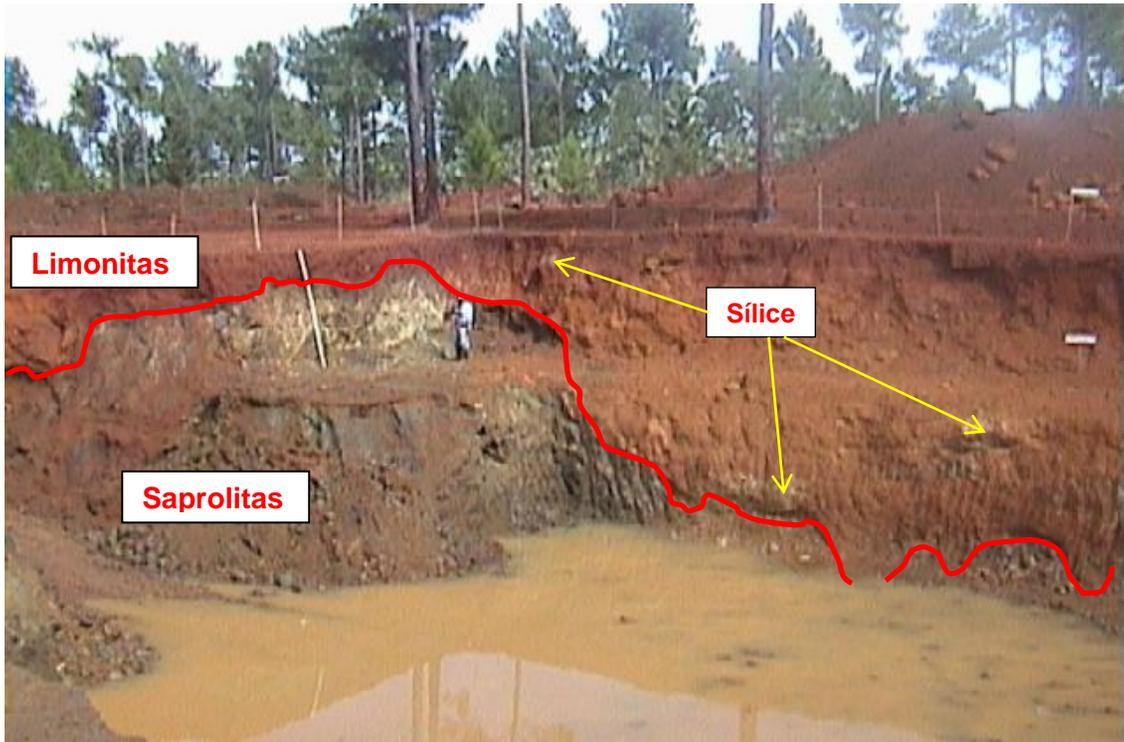


Figura. 4.4.2.1. Vista vertical del depósito San Felipe. Cobas 2016.

Se presenta en prácticamente todos los horizontes de la corteza de intemperismo abundante sílice libre en forma de ópalos, calcedonias y marshalita comprobado durante las perforaciones de los trabajos de prospección desarrollados en San Felipe, Formell et al (1998, 1999, 2000).

4.4.3. Perfil de intemperismo en el depósito San Felipe

Figura. 4.4.3. Cobas (2007).



ONTCP: Ogres no texturales con perdigones o pisolitos de hierro, son los primeros en aparecer en el perfil, de arriba hacia abajo, los perdigones se encuentran en proporción, diámetros y formas variables, su tamaño y por ciento de participación en la masa disminuyen en profundidad, generalmente los pisolitos se hacen más frecuentes próximos a la superficie y a veces forman una capa superficial de perdigones sueltos. Se distribuyen también irregularmente fragmentos o bloques de sílice libre y coraza de hierro con sílice. La coraza está formada por la aglomeración de pisolitos de hierro y fragmentos de sílice en una masa silicificada, provocado por la movilización a corta distancia del hierro y reprecipitación del hierro favorecido por la acción de los ácidos orgánicos producidos por las raíces de las plantas. Formell y Buguel'skiy (1967). Hacia abajo en el perfil los perdigones comienzan a disminuir su tamaño y cantidad, dando paso gradual a los *ogres no texturales sin perdigones*. La potencia promedio de este primer horizonte es de 4 m y oscila entre 1 m y 14 m en el depósito.

ONT: Ogres no texturales sin perdigones de hierro, estos ogres conjuntamente con los ogres no texturales con perdigones van conformando la parte limonítica del perfil de intemperismo en el depósito. Es un material ocreo arcilloso, donde la textura de la roca que le da origen aún no es visible, en profundidad se pasa gradualmente al horizonte de los Ogres Texturales Limoníticos (OTL). La potencia promedio es de 3.4 m y varía de 1 m a 16 m.

OTL: Ocrex texturales limoníticos, de color amarillo-pardo-naranja que pasan hacia abajo a coloraciones abigarradas rojo-verdosas con tonalidades negruzcas debido a la presencia de asbolana¹⁰ y contiene fragmentos de sílice en proporciones y tamaños variables, distribuidos irregularmente en toda la masa. Este horizonte puede considerarse el paso gradual de las limonitas a la parte saprolítica del perfil. Estas limonitas son ocrosas, pulverulentas, con predominio de los óxidos e hidróxidos de hierro, goethita y limonita y van pasando gradualmente a ser arcillosas, es decir, más nontroníticas cerca del límite con el siguiente horizonte, la cual se puede definir como una zona de transición. Por las concentraciones que ya comienza a alcanzar el Ni en este horizonte, se considera que forma parte de la zona mineral. Su potencia promedio es de 6 m y varía de 1 m a 17.5 m.

Estos tres horizontes, que dentro del perfil, lo llamamos zona de las limonitas, presentan las mayores concentraciones de Fe_2O_3 , Al_2O_3 y Cr_2O_3 , SiO_2 , las concentraciones de MgO y Ni son relativamente bajas. En el horizonte de los OTL el Mn se encuentra en forma de pátinas y se concentran los mayores contenidos de Co. Su humedad aumenta en la medida en que los horizontes son más arcillosos, o sea en profundidad.

Tabla 4.4.3.1. Concentración de los elementos químicos en la zona de las limonitas

Horizontes	Contenidos de los elementos químicos en %							
	Ni	Fe	Co	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	% Humedad
ONTCP	0.40	32.49	0.05	25.90	0.54	11.89	2.21	16.97
ONT	0.45	27.18	0.034	39.39	1.15	7.79	1.70	22.49
OTL	0.83	26.03	0.065	40.92	2.68	6.25	1.54	31.25

¹⁰ óxido hidratado de manganeso con cobalto y níquel que puede llevar impurezas de aluminio, calcio, hierro o silicio. Sinónimos menos empleados son aithalita, cobalto negro, grafito cobáltico o cobaltida. Normalmente es un producto de la alteración de otros minerales de manganeso. También puede aparecer en esquistos silíceos metamórficos, así como en el regolito residual a partir de rocas ígneas ultramáficas.

OTS: Ocrex texturales saprolíticos, aparecen las esmectitas (nontronitas, nepouita, saponita, etc.), son los principales portadores de la mineralización de Ni en el perfil, conservan la textura de la roca madre, la coloración es verde olivo, verde brillante, untuosos al tacto, cerosos, con presencia de kerolita y serpofita. Los contenidos de sílice libre se distribuyen irregularmente, en forma de ópalos, de colores variables, generalmente verdosos, rojizos y blancos. La potencia promedio es de 10 m y varía de 0 m hasta los 26 m.

SN: Serpentinitas nontronitizadas, es el próximo horizonte hacia abajo en el perfil, son ligeras, de color verde, gris verde y verde claro, usualmente con finas vetillas reticulares en una textura ofítica en ocasiones rellenas de ópalo, kerolita y serpofita. Frecuentemente se observan cristales de piroxenos alterados a bastitas así como olivino alterado como relictos de las harzburguitas originales. El espesor de este horizonte como promedio es de 11 m, oscilando entre 1 m y 29 m.

SL: Serpentinitas lixiviadas, es el horizonte inferior del perfil de intemperismo en el depósito, son rocas en apariencia similares a las rocas madres pero se diferencian de estas por ser menos densas y más porosas, ligeras al tomarlas en las manos. Su espesor promedio es de 13.9 m y oscila entre 1 m (un metro) y los 39 m.

Estos tres horizontes conforman la zona de las saprolitas, los valores de Ni se incrementan en los OTS y en las SN comienzan a disminuir, la SiO₂ se mantiene con valores poco variables como dentro de todo el perfil y el MgO aumenta en las SN y en las SL, mientras que el Co decrece.

Tabla 4.4.3.2. Concentración de los elementos químicos en la zona de las saprolitas

Horizontes	Contenidos de los elementos químicos en %							
	Ni	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	% Humedad
OTS	0.98	21.69	0.053	46.00	4.88	4.78	1.42	35.76
SN	1.05	14.25	0.035	48.10	14.21	3.43	1.01	36.69
SL	0.75	11.35	0,022	47.50	22.69	2.38	0.83	32.44

Roca madre: Al final de los horizontes intemperizados, aparece el basamento y está representado fundamentalmente por harzburgitas serpentinizadas desintegradas, muy poco representadas las dunitas y se ha reportado la ocurrencia de materiales leucocráticos tanto en el basamento como en otras posiciones dentro del perfil de intemperismo. En esta zona todos los elementos disminuyen notablemente a excepción del MgO que aumenta y la SiO₂, que aún cuando ha disminuido, se mantiene alta.

Tabla 4.4.3.3. Concentración de los elementos químicos en el basamento

Horizontes	Contenidos de los elementos químicos en %							
	Ni	Fe	Co	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	% Humedad
Harzburgita serpentinizada	0.39	7.10	0.013	40.97	31.7	1.34	0.55	14.9

4.4.4. Composición de la roca madre

El basamento como se ha dicho, está representado por rocas de la asociación ofiolítica, con un predominio en lo fundamental de la zona de transición o MTZ compuesto por las peridotitas (harzburgitas, lherzolitas, wherlitas), dunitas y diques de piroxenitas, gabros, microgabros y diabasas. Ver figura 4.4.4.

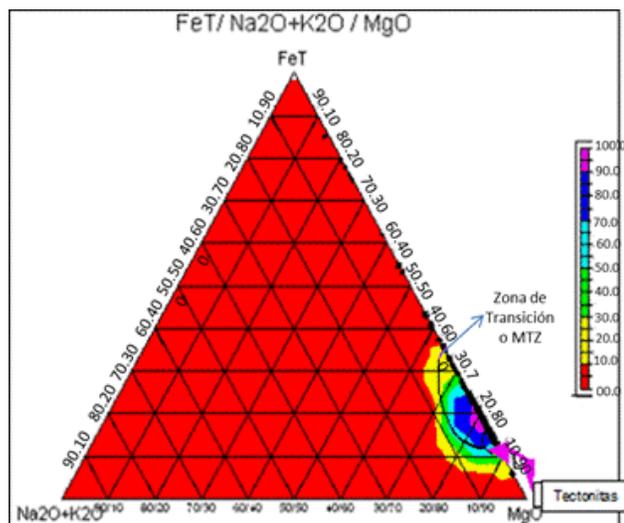


Figura 4.4.4. Diagrama petrológico AFM de San Felipe, Rodríguez (2001). Inédito.

El basamento posee forma sinusoidal, con bolsones y elevaciones alternantes, se han reportado ocurrencias de materiales leucocráticos. En esta zona todos los elementos disminuyen notablemente a excepción del MgO que aumenta alcanzando valores por encima de 30 % y la SiO₂, que aún cuando ha disminuido se mantiene alta. Ver tabla 4.4.3.3.

4.5. Características Geofísicas

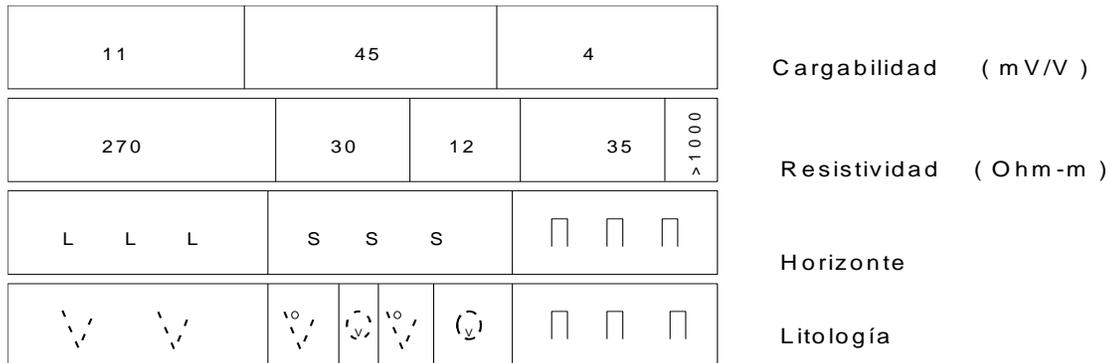
Teniendo en cuenta la complejidad geológica de los depósitos de corteza de intemperismo, la variabilidad de sus potencias, el aspecto sinuoso del sustrato rocoso, la presencia de bloques flotantes no intemperizados dentro de la corteza, la presencia de corteza a partir de rocas no ultramáficas, se han buscado alternativas para su mapeo empleando métodos geofísicos. Las características geológicas, químicas y mineralógicas de las cortezas producen diferentes comportamientos físicos ante estos métodos probados para su estudio.

Con los métodos aerogeofísicos, (aerogamma - espectrométrico - magnético), eléctricos (sondeo eléctrico vertical de polarización inducida (SEV-PI)), terrestres (susceptibilidad magnética, magnetometría, petrofísicos y de Georadar o radar de penetración terrestre (GPR –Ground Penetrating Radar), se ha podido caracterizar la corteza de intemperismo y establecer una correlación entre estos parámetros y la geología, permitiendo determinar el límite corteza - basamento, el espesor de la corteza, el relieve del basamento entre pozos perforados, la presencia de bloques no intemperizados, la cartografía de las alineaciones y discontinuidades asociadas a la tectónica, las heterogeneidades físicas (magnéticas y eléctricas) y otros fenómenos geológicos de la corteza de intemperismo y el basamento.

4.5.1. Sondeo eléctrico vertical y polarización inducida

El Sondeo Eléctrico Vertical de Polarización Inducida (SEV-PI): es uno de los métodos eléctricos para estudiar la distribución de los parámetros geo-eléctricos (resistividad aparente, cargabilidad) y logra determinar los contactos horizontales.

Los valores altos de resistividad aparente en San Felipe están revelando la presencia de la sílice libre en todo el corte y zonas de cuarcificación, de roca dura o poco alterada o ligeramente agrietada, Geominera Geofísica (1998).



Leyenda: L- Limonitas; S- Saprolitas; □-Peridotitas; V - Ocrez texturales limoníticos y saprolíticos; V- Fragmentos de rocas

Figura 4.5.1.1. Modelo de Interpretación según SEV-PI.

Estos parámetros de resistividad y cargabilidad logran determinar la frontera entre horizontes del perfil y entre la zona intemperizada y el relieve del basamento con alta correlación con datos obtenidos durante la perforación y en general facilitan:

- El mapeo de las fronteras entre las limonitas y las saprolitas.
- Se determina con exactitud la distribución y la potencia de la coraza de Fe.
- Las curvas SEV-PI, tipos KQH y QH, nos indican que estamos en presencia de un depósito con poco espesor limonítico.

4.5.2. Susceptibilidad magnética

La intensidad de la susceptibilidad magnética (SM), está relacionada directamente con los minerales magnéticos y es proporcional al número de electrones no apareados en su último nivel, por tanto, los valores de la SM en la corteza reflejan esta característica de heterogeneidad. Cuando se determina el contenido de Fe en el laboratorio da un valor, que no indica la mineralización presente, que puede ser hematita, ilmenita, maghemita o magnetita. La SM si indica la presencia de

magnetita y no de hematita. Los gabros del complejo ofiolítico no son magnéticos, por lo que puede ser una herramienta eficaz para evaluar, clasificar y separar tales secuencias litológicas durante la prospección, exploración y el desarrollo minero, Hernández (2014).

4.5.3. Método de georadar (GPR –Ground Penetrating Radar)

El uso del radar de penetración terrestre (GPR –Ground Penetrating Radar) posibilita el mapeo de la corteza de intemperismo, ya que en su constitución aparecen minerales metálicos como el Fe, el Ni entre otros, lo que facilita determinar con alta precisión el volumen del depósito, definiendo el contacto de la corteza de intemperismo con las rocas del basamento.

Los datos adquiridos en San Felipe indican que el GPR es una herramienta altamente eficaz para trazar la profundidad y naturaleza de las intercalaciones rocosas de la corteza y el contacto con la roca de fondo, es conveniente utilizarla conjuntamente con otros métodos geológicos directos tales como perforaciones. Este método puede también ser útil para la optimización y el diseño detallado de bloques y bancos que minan individualmente en el planeamiento que minero. Francké (2002).

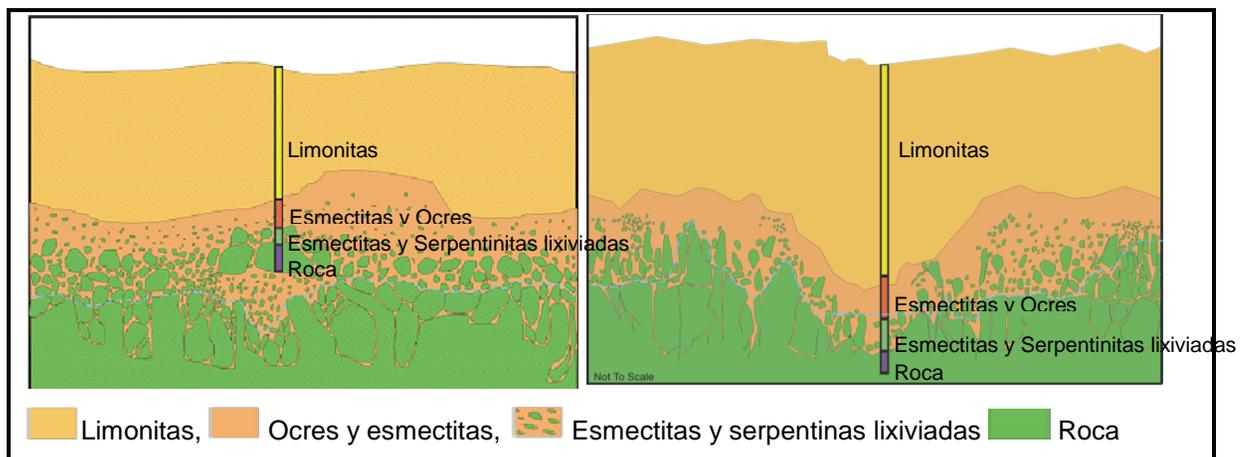


Figura 4.5.3.1. Resultados simulados del Georadar y su coincidencia con pozos de perforación en San Felipe.

La delimitación del contacto friable con el fondo se determina de manera continua, rápida y económica, aumentando la precisión de la delimitación de la corteza, posibilitando una estimación de los recursos más cercana a la realidad. En la figura 4.5.3.2 se muestran dos perfiles supuestos del GPR con pozos perforados en San Felipe y se observa la coincidencia de la información del mapeo con el método del Georadar, comparado con los resultados del pozo de perforación, notándose que donde el pozo cortó los diferentes horizontes y hay un cambio de zona, el perfil del GPR presenta también un cambio, lo que demuestra la efectividad del método para el mapeo y estudio de estos depósitos.

4.5.4. Aerogeofísica

La información aerogeofísica, que puede ser obtenida por líneas de vuelo o de las matrices aerogeofísicas, permite confeccionar diferentes mapas de isolíneas, de relieve sombreado con diferentes grados, permite obtener alineaciones morfológicas, sectorizar áreas de interés, correlacionando cada sector definido por este método con los datos geológicos, áreas de mínimos y máximos, aerogeofísicos, así como otras características de interés.

4.5.5. Magnetometría

Para la cartografía de la tectónica en la prospección y exploración de este tipo de depósito es necesaria esta información geofísica ya que complementa la información geológica existente, permite sectorizar los mismos y poder ubicar pozos, laboreos mineros, seleccionar áreas de más perspectiva, etc.

4.6. Características de las menas y de la ganga

Los elementos útiles fundamentales del depósito San Felipe son el níquel y el cobalto, los contenidos de níquel fluctúan entre 0.4 y 4.18 % y los de cobalto 0.014 y 0,057 %. Los minerales útiles son mayoritarios y constituyen entre un 65-82 % de la masa total de las muestras, representados por aluminosilicatos del grupo de

las esmectitas (nontronita y poca montmorillonita), óxidos de hierro (hematita, goethita, Trevorita), serpentina, clorita, sílice amorfa, cromita y cuarzo, concentrándose por lo general, en las fracciones finas. La composición granulométrica se caracteriza por un alto contenido de las fracciones finas -0.074 mm, (52-76 %) debido al predominio de los minerales arcillosos en su composición mineralógica y siendo estos los principales portadores de Ni. El mineral nontronítico del depósito San Felipe contiene 1,62 % Ni, la montmorillonita contiene 2,00 % Ni, el mineral serpentínico 2,4 %, la clorita férrica contiene 2,23 % Ni, los óxidos y oxihidróxidos de Fe 2,73 % Ni. Las fases minerales propias de Ni identificadas en San Felipe fueron: la Trevorita y ernieniquelita y se encuentran fundamentalmente como inclusiones dentro de la nontronita, óxidos de manganeso, óxidos de hierro y serpentina, Cabrera et al (2005).

La ganga representa de un 12-30 % de la masa total de las muestras investigadas y de ella el mineral mayoritario es la sílice libre, concentrándose en las fracciones por encima de 1mm y en la fracción por debajo de 0.074 mm. El resto de la ganga corresponde a la magnetita, cromita y concreciones de hierro. La sílice libre es del 44-66 % en peso de la ganga, que se encuentra en un rango de 55 -73 % en peso en las fracciones gruesas (+1 mm). Los otros minerales que componen la ganga, cuyos contenidos no son altos, son: magnetita 24 - 42 % y cromita 2 - 20 % en peso del total del estéril y se concentran en la fracción -0.074 mm, esta fracción en un 84-85 % está compuesta por minerales arcillosos portadores de níquel, cuya presencia dificulta y hace muy poco eficiente cualquier método de separación y beneficio. Los minerales de sílice son ópalo, calcedonia y cuarzo. Cabrera et al (2005).

El ópalo predomina en las fracciones gruesas, en tanto que los cristales de cuarzo son más abundantes en las fracciones finas, en esta fracción también se puede observar sílice libre pulverulenta (marshallita) que es un fino polvo de sílice de color blancuzco amarillento.

4.6.1. Mineralogía, texturas, estructuras y tamaño de los granos

El depósito San Felipe atendiendo a la clasificación mineralógica realizada por Brant et al (1998), es del Tipo B, depósito de silicatos de níquel, dominado por arcillas esmectíticas (nontronita, nepuita, saponita, etc.), este tipo representa entre el 5 y 10 % de los recursos globales, Freyssinet (2015), así lo confirman las investigaciones mineralógicas, característica a tener en cuenta durante la minería y el procesamiento del mineral. Aparecen otros minerales relacionados que pudieran presentar interés económico, los cuales han sido reportados en lateritas en Cuba, denominados como depósitos no convencionales de elementos del grupo del platino, Proenza et al (2013, 2015).

Los horizontes de los ocre no texturales son poco compactos, constituidos mayoritariamente por óxidos y oxi-hidróxidos de hierro (hematita y goethita) y en menor cantidad, cuarzo y lizardita, adaptado de Marín et al (2011).

El horizonte de los ocre texturales limoníticos es poco compacto, con abundante porosidad y fracturas, la cantidad de hematitas disminuye considerablemente respecto a las del horizonte de los ocre no texturales, a tal punto que en el espectro de DRX (Figura 4.6.1.1), sólo se observan indicios de ésta. La goethita, sin embargo, sigue siendo una de las fases mayoritarias (Figura 4.6.1.2).

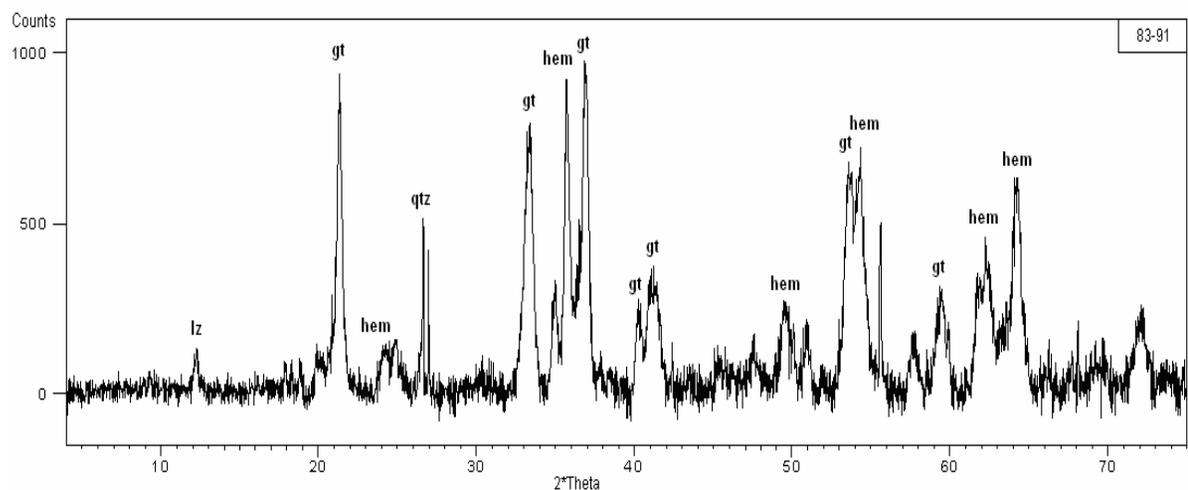


Figura 4.6.1.1: Espectro de DRX. Muestras de limonitas del depósito San Felipe. Minerales lz: lizardita, gt: goethita, hem: hematitas, qtz: cuarzo.

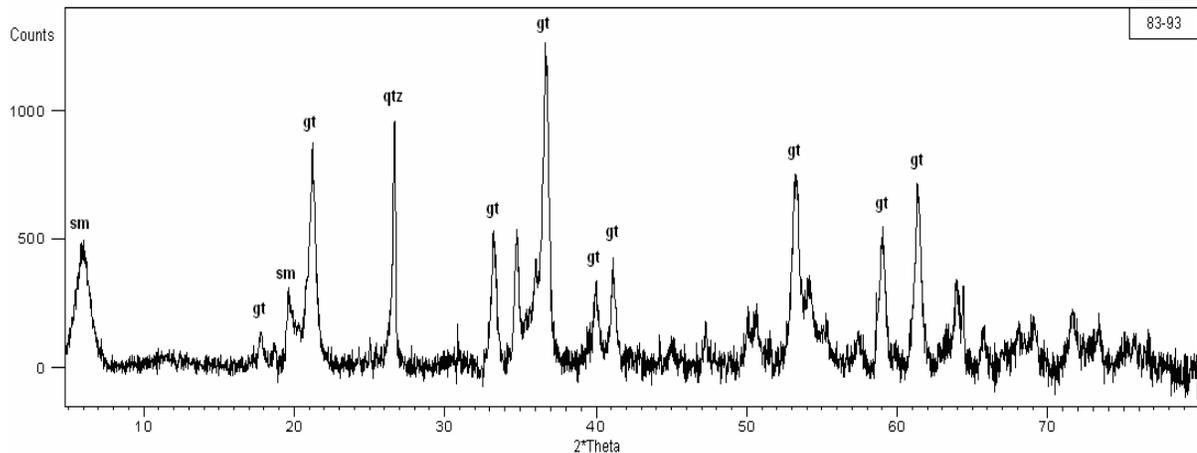


Figura 4.6.1.2: Espectro de DRX. Muestras de ocre texturales limoníticos del depósito San Felipe. Minerales: sm: esmectita, lz: lizardita, mgh: maghemita. (Adaptado de Marín et al (2011),

Las muestras contienen, además, un mineral del grupo de las esmectitas y cuarzo. Hacia la parte inferior del perfil empieza a aparecer maghemita. El cuarzo está en las muestras en agregados criptocristalinos, de tamaño superior a 200 μm , deformados y con los bordes redondeados. Adaptado de Marín et al (2011).

La esmectita se presenta formando agregados criptocristalinos irregulares, porosos y con inclusiones de óxidos o hidróxidos de Fe. Los cristales de maghemita presentan tamaños superiores a 300 μm y están muy fracturados (Figura 4.6.1.3).

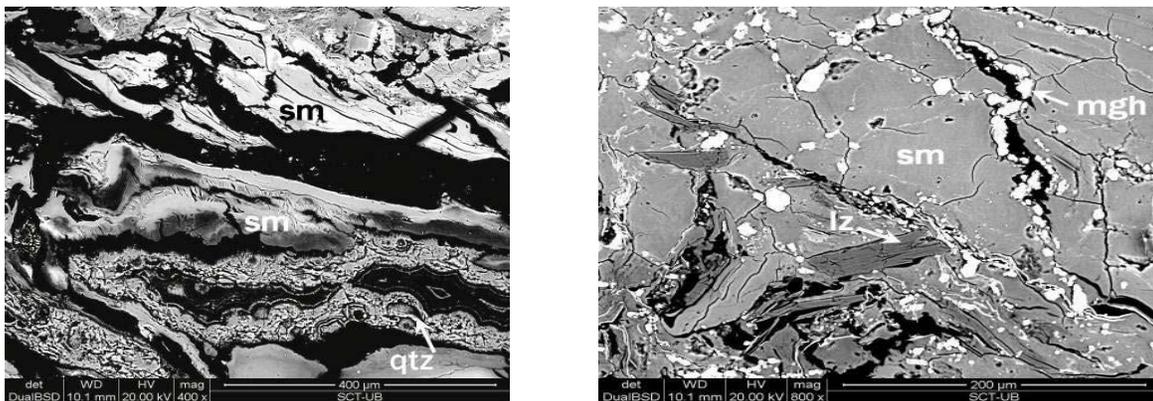


Figura 4.6.1.3: Imagen de electrones retrodispersados de agregado botroidal criptocristalino de cuarzo con esmectita y de agregados criptocristalinos de esmectita con lizardita y maghemita.

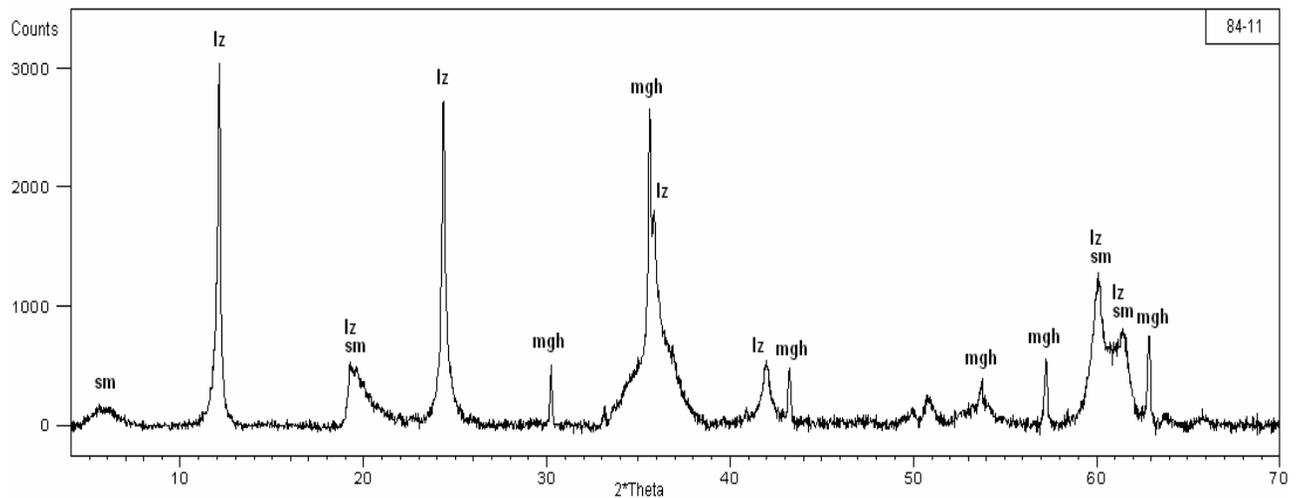


Figura 4.6.1.4. Espectro de DRX. Muestras de serpentinas nontroníticas del depósito San Felipe. Minerale: sm: esmectita, lz: lizardita, mgh: maghemita. (adaptado de Marín et al (2011)).

En la zona de las saprolitas, que abarcan los ocres texturales nontroníticos, las serpentinas notronitizadas y las serpentinas lixiviadas, la fase mayoritaria es la de las esmectitas. Los resultados de los análisis SEM-EDS muestran que corresponde a una nontronita rica en Ni fundamentalmente, aunque aparecen otras esmectitas menos distribuidas.

El horizonte de los ocres texturales nontroníticos se caracteriza por la presencia de una esmectita rica en Fe, junto con goethita, cuarzo y en menor proporción hematita. Finalmente, la zona de las limonitas se compone mayoritariamente de goethita y hematitas, cuarzo y en mucha menor proporción lizardita. Gallardo et al (2005).

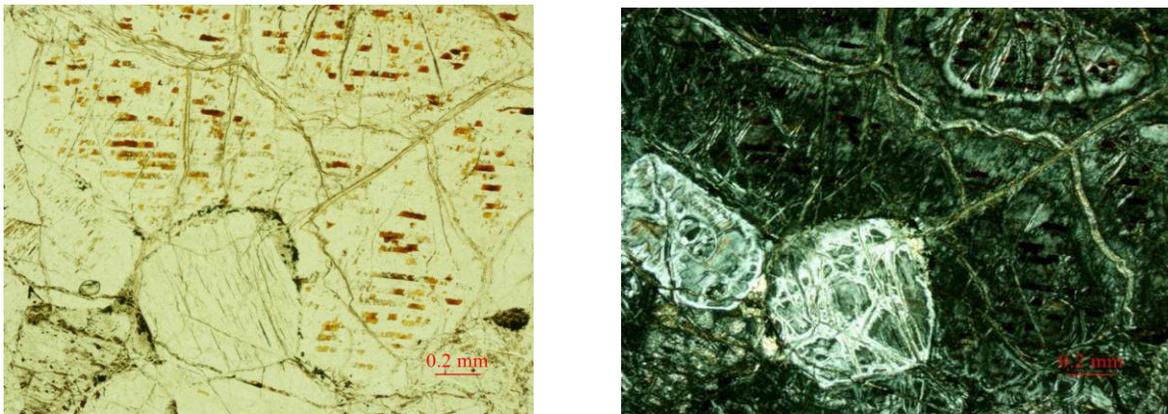


Figura 4.6.1.5. Imágenes de microscopía óptica en nicols paralelos y nicols cruzados de cristales de piroxeno totalmente pseudomorizados a lizardita.

La zona de las serpentinas lixiviadas se caracteriza por tener lizarditas y muy poca esmectita. Los cristales de piroxenos están totalmente remplazados por lizardita. Se observa además una película de un mineral criptocristalino de color rojizo, (probablemente goethita) en los planos de exfoliación de los piroxenos. (Fig. 4.6.1.5). En algunas muestras se observan fracturas de hasta 0,2 mm rellenas de lizardita, Marín et al (2011)

Igualmente, los granos de olivino están completamente reemplazados por minerales del grupo de la serpentina (lizardita). La alteración se inicia en los bordes y en las fracturas de los cristales, en las que precipitan óxidos e hidróxidos de Fe. Los núcleos de olivino están alterados a esmectitas y aparecen también agregados criptocristalinos de esmectita (Figura 4.6.1.6).

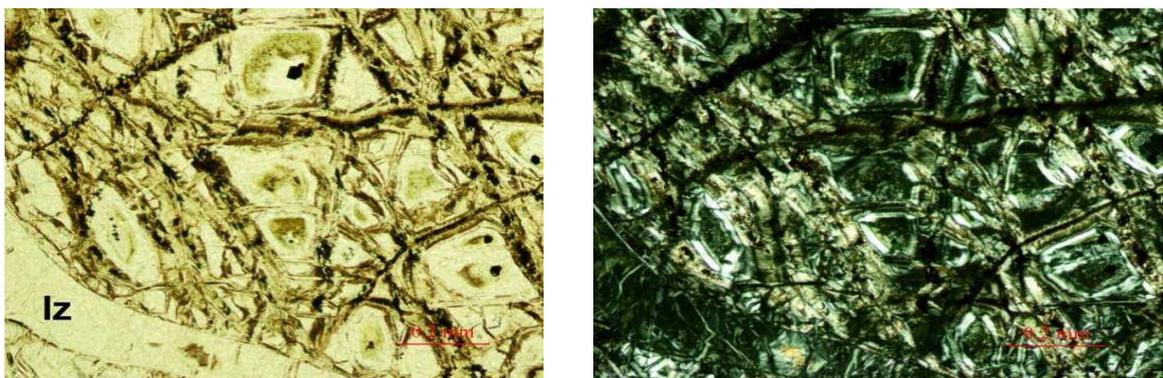


Figura 4.6.1.6. Imágenes de microscopía óptica en nicols paralelos y cruzados. Textura reticular pseudoóptica típica en la alteración de olivino a lizardita.

Algunas muestras de este horizonte presentan una composición ligeramente diferente, con acumulaciones de fragmentos de aproximadamente 1 mm x 0,2 mm de sílice secundario que ha precipitado en forma de agregados botroidales, (Figura 4.6.1.7.). Marín et al (2011).

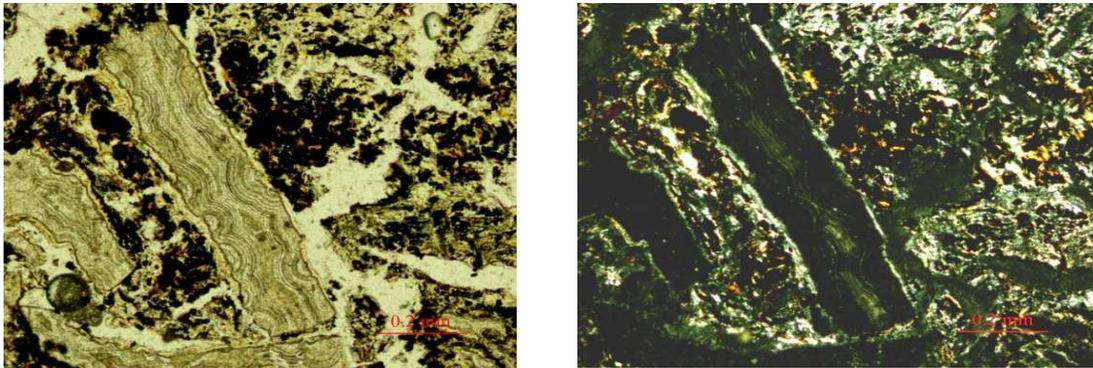


Figura 4.6.1.7. Imágenes de microscopía óptica en nicols paralelos y nicols cruzados de bloques de agregados botroidales de cuarzo.

En algunas muestras de saprolita se ha identificado un mineral del grupo de la clorita (Figura 4.6.1.8). En estas muestras, los granos de clorita, de aproximadamente 100 μm de largo, están rodeados de agregados criptocristalinos de esmectita, que a su vez contiene inclusiones de óxidos e hidróxidos de Fe.

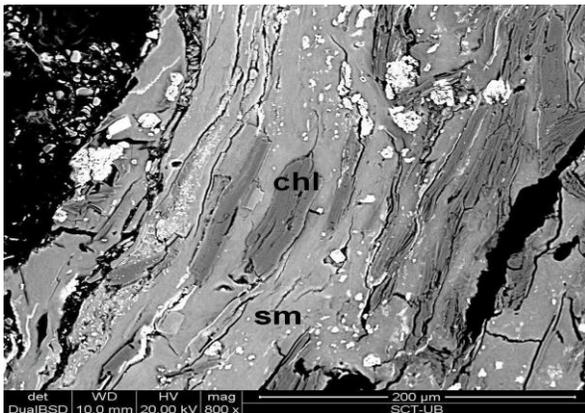


Figura 4.6.1.8. Electrones retrodispersados de cristales de clorita rodeados por agregados criptocristalinos de esmectita.

El estudio de la composición sustancial realizado por Cabrera et al (2005), fue sobre la base de análisis petro-mineralógico, granulométrico y de fases, lo cual permitió profundizar en el conocimiento de las características mineralógicas y la

distribución granulométrica de los principales minerales portadores de Ni. En este estudio los resultados esclarecieron los minerales portadores de níquel así como el hallazgo en Cuba del mineral ernieniquelita (óxido de Mn).

Las esmectitas constituyen un porcentaje considerable de la composición mineralógica de todos los horizontes del perfil, destacándose la nontronita, la montmorillonita, alúmino-silicato de magnesio con contenido alto de hierro de superficies muy intemperizadas y con contenidos significativos de níquel, mineral de olivino serpentizado con contenido de níquel, el clorato de Ni hidratado, fundamentalmente dentro de los olivinos serpentizados y en poca proporción la clorita, el silicato de níquel se encuentra muy entrecrecido con los silicatos de magnesio, fundamentalmente los minerales del grupo de la esmectita y en menor proporción con la serpentina, siendo los principales portadores de Ni. Cabrera et al (2005).

Aparecen óxidos de hierro goethita, hematita e hidróxidos amorfos, los que se encuentran finamente entrecrecidos y forman las concreciones que se observan en las fracciones gruesas. Aparecen en menor cantidad magnetita, probablemente con maghemita en forma de granos esqueléticos octaédricos redondeados o láminas libres en las fracciones finas y como inclusiones en las fracciones gruesas. Se presentan minerales de serpentininas como antigorita, la serpentina aparece alterada formando pequeñas vetillas y nidos de nontronita, aparece crisotilo en cantidades insignificantes. Cabrera et al (2005).

Los minerales de sílice libre son ópalo y cuarzo, se observan en costras, láminas y fragmentos irregulares, raras veces en agregados globulares, en pequeños cristales, frecuentemente presentan dendritas de óxidos de manganeso. Aparecen otros minerales como la cromita y los óxidos de manganeso con contenido de Ni.

Tabla 4.6.1.1: Terminología alternativa de las lateritas níquelíferas y mineralogía general, de Samama (1986) y Freyssinet y otros (2005). Comparado con San Felipe, Cobas (2016).

Tipo de Mena	Zona	Horizontes en San Felipe	Nomenclatura alternativa	Minerales portadores de níquel en San Felipe
Óxidos	Limonitas	Ocre no Textural con Perdigones	Pisolitos, ocre inestructurales con perdigones	óxidos y oxi-hidróxidos de hierro (hematites y goethita), en menor proporción, cuarzo y lizardita.
		Ocre no Textural sin Perdigones	Ocre inestructural, laterita roja, saprolita de grano fino	óxidos y oxi-hidróxidos de hierro (hematites y goethita), en menor proporción, cuarzo y lizardita.
Transición	>Limonita< Saprolita	Ocre Textural Limonítico	Goethitas laterita amarilla, zona de limonitas	Goethita, esmectita, cuarzo y en la parte inferior del horizonte comienza a aparecer la maghemita
Arcillas	Saprolitas	Ocre Textural Nontronítico	Zona de cuarzo, esmectita, zona de cuarzo goethita, zona de nontronita, zona de arcillas moteada	esmectita (fundamentalmente nontronita rica en níquel), goethita, cuarzo y en menor proporción hematites
		Serpentina Nontronítica	Saprolita, mena serpentina, serpentina suave, saprolita suave, serpenntina saprolítica	Esmectitas, lizarditas, maghemitas
		Serpentina Lixiviada	Saprolita dura	Lizarditas, en menor proporción esmectitas

La composición granulométrica se caracteriza por un alto contenido de las fracciones finas, -0.074 mm, entre un 52-76 % debido al predominio de los minerales arcillosos en su composición mineralógica y siendo estos los principales portadores de Ni, lográndose una recuperación en un 57-85 % en esta fracción. En los minerales ferrosos así como en la sílice, la mayor proporción la tienen los minerales amorfos.

4.7. Intemperismo. Procesos supergénicos

4.7.1. Reacciones y factores controladores

El desarrollo de los productos de intemperismo está controlado por la temperatura, el agua y el pH que condicionan las reacciones químicas que ocurren durante la formación de las cortezas de intemperismo. La oscilación de la temperatura en la región de Camagüey, de una época de invierno seco a una época cálida y húmeda, era de alrededor de los 10° C, Díaz (1989), Motito (2013).

El factor que más influye en el proceso de intemperismo es el agua que actúa como agente agresivo en la lixiviación e hidrólisis, permitiendo la salida del sistema de la sílice y el magnesio disueltos y por tanto una concentración de los elementos menos móviles y solubles como el Fe, Ni y Co. Esta concentración de los minerales secundarios constituye la mineralización fundamental de las lateritas de níquel y cobalto.

4.7.2. Efectos micro y macroclimáticos

La temperatura y las precipitaciones son factores determinantes en el proceso de intemperismo. El clima tropical a subtropical existente en el área donde se desarrollan las lateritas del depósito San Felipe, experimenta lluvias suficientes para el intemperismo, lo que posibilitó la transformación de las peridotitas serpentizadas en productos de intemperismo, ya que estas condiciones favorecieron la disolución de la sílice y el magnesio en las aguas hasta la saturación y su posterior precipitación en las partes inferiores del sistema o fuera del mismo en dependencia de las condiciones geomorfológicas, permitiendo la formación de nuevos minerales a partir de la concentración de los elementos menos móviles como el hierro, níquel y cobalto en una corteza con distribución zonal de los nuevos minerales distribuidos inicialmente en una zona de silicatos y finalmente en una zona de óxidos e hidróxidos. La alternancia de períodos secos y lluviosos es un factor determinante en el desarrollo de los procesos de

intemperismo, porque permite, la disolución y extracción de los elementos móviles y su salida del sistema o su reprecipitación de manera alternante y consecutiva y por tanto facilitando la aeración y oxidación de los productos residuales que se van formando.

4.7.3. Efectos de las condiciones hidrogeológicas

La existencia de zonas de debilidad tectónica y la porosidad de las rocas favoreció la circulación de las aguas subterráneas de grietas y de poros y con ello la más efectiva consecución de los procesos de intemperismo químico. En este ambiente la sílice y el magnesio fueron extraídos por las aguas agresivas, estas sobresaturadas en sílice y magnesio y en su lenta transferencia y extracción del sistema estos elementos fueron precipitados en las zonas más bajas de la corteza de intemperismo en forma de sílice libre (ópalos y calcedonias) y magnésita rellenando las grietas prototectónicas y las zonas de fallas de las ultrabasitas.

En los horizontes de las saprolitas encontramos las mayores cotas de los niveles de las aguas. En las mayores cotas de elevación de la meseta (191.23 m como máximo) es precisamente donde se observan los niveles de agua más profundos según los datos aportados por las mediciones realizadas. El drenaje es de tipo lineal y dendrítico, en los bordes se observa la presencia de manantiales que descargan sus aguas hacia las laderas de la meseta, fundamentalmente hacia el SE.

En la porción central del área se observa una zona húmeda, casi pantanosa, que durante el período de observación de los niveles, se mantuvieron elevados, aumentando aún más en la etapa de lluvia, formándose lagunas extensas de profundidades variables, como máximo 0.90 m. En su porción oeste continúan los niveles de agua alto, ya que sirve de drenaje al agua de la porción central.

En las zonas donde el nivel de agua es profundo por efecto de la topografía y la tectónica, existe mayor potencia mineral, favorecida por entrada y salida de agua

enriquecida, no así, en la parte central de la meseta, donde los niveles son más altos, en los cuales observamos poca potencia de mineral, encontrando áreas sobresaturadas en agua, reflejando poca salida de la misma del sistema.

En general los niveles de las aguas promedian 4.73 m. La descarga del agua subterránea en San Felipe es a través de manantiales presentes en las laderas, alimentando arroyos como Pontezuela, Bainoa y otros.

4.8. Características geoquímicas

La geoquímica del depósito ha sido realizada con el procesamiento y análisis de las determinaciones químicas de las muestras tomadas durante las perforaciones de más de mil pozos en el depósito de San Felipe.

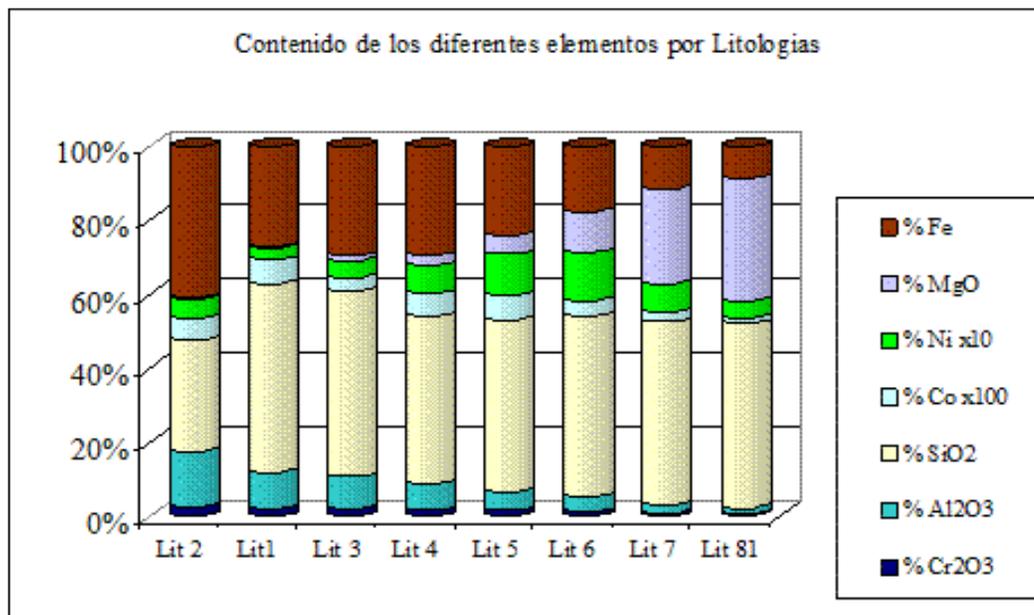


Figura 4.8.1. Comportamiento de los elementos químicos en cada horizonte.

El comportamiento de los elementos químicos es errático y diferente al comportamiento de estos en otros depósitos lateríticos conocidos y estudiados en Cuba. Se determinaron por el método de ICP, el Fe, Ni, Co, Al₂O₃, MgO, SiO₂, en un número más reducido de muestras el Cr₂O₃ y el CaO.

En la figura 4.8.1 se presenta la variabilidad en profundidad del contenido de los principales componentes químicos que permite realizar el análisis geoquímico general del depósito por los diferentes horizontes que conforman el perfil de intemperismo de San Felipe. En la figura 4.8.2 se observa el comportamiento del SiO_2 , Al_2O_3 y MgO y en la figura 4.8.3 el comportamiento del Fe, Ni y Co, sin tener en cuenta los cambios entre los horizontes, notándose que en los horizontes saprolíticos, las fluctuaciones son mayores, aunque mantienen la tendencia.

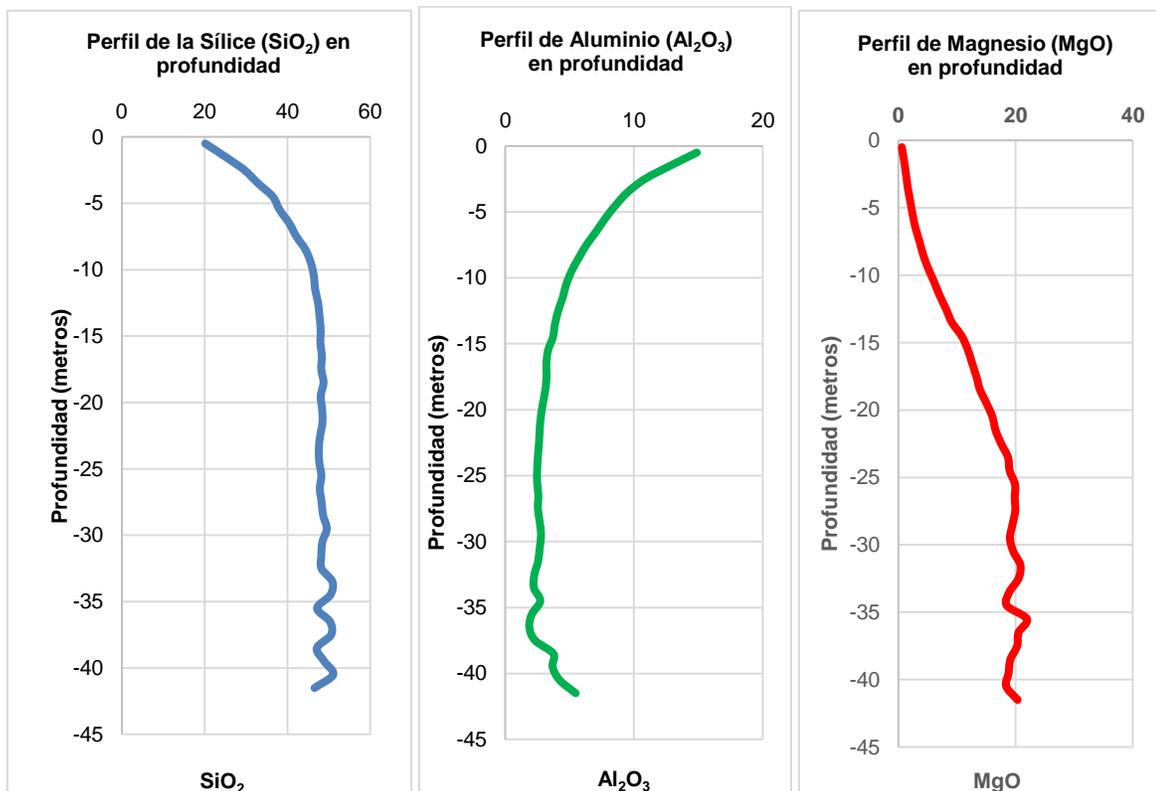


Figura 4.8.2. Perfil en profundidad de SiO_2 , Al_2O_3 y MgO en San Felipe.

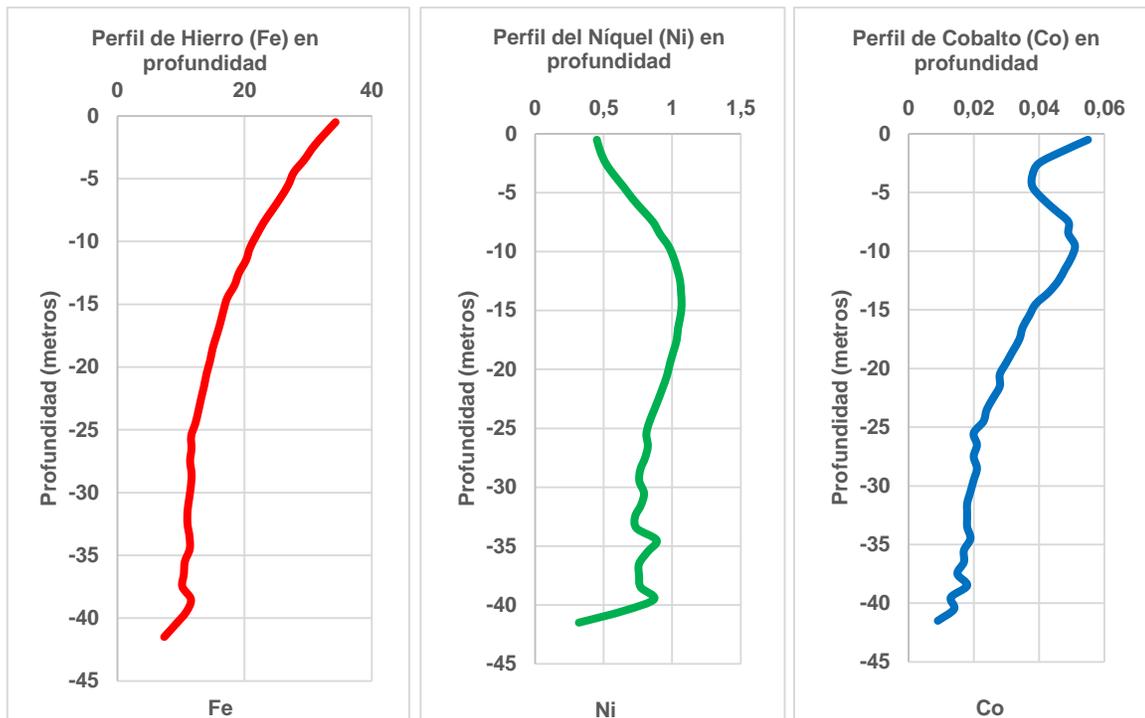


Figura 4.8.3. Perfil en profundidad de Fe, SiO₂ y MgO en San Felipe.

En la tabla 4.8.1 se presentan los códigos y descripción de los horizontes del perfil de intemperismo, utilizados para la descripción de los pozos de San Felipe.

Tabla 4.8.1. Códigos y descripción de los horizontes del perfil de intemperismo utilizado para San Felipe

Código	Descripción del horizonte del corte de intemperismo
Lit 1	Coraza de Fe ₂ O ₃ -SiO ₂
Lit 2	Ocres no texturales con pisolitos de Fe ± Coraza/canga
Lit 3	Ocres no texturales sin pisolitos
Lit 4	Ocres texturales limoníticos. Zona de transición.
Lit 5	Ocrestexturales nontroníticos (limonita > nontronita)
Lit 6	Serpentinas nontroníticas (% nontronita > % serpentina)
Lit 7	Serpentinas lixiviadas (pasando gradualmente a rocas frescas)
81	Roca madre

En las figuras 4.8.4 y 4.8.5. se muestra el comportamiento geoquímico de 6 de los elementos determinados en las investigaciones realizadas. El eje superior muestra los valores de las concentraciones, en porcentaje, de los diferentes elementos químicos y en el eje vertical se muestran los intervalos de muestreo en el pozo en

Tesis Doctoral Rosa María Cobas Botey

profundidad, en metros. Como se muestra en la leyenda el valor de Co se multiplica por 100 y el del Ni por 10 para que fueran visibles y no se pegaran al eje vertical.

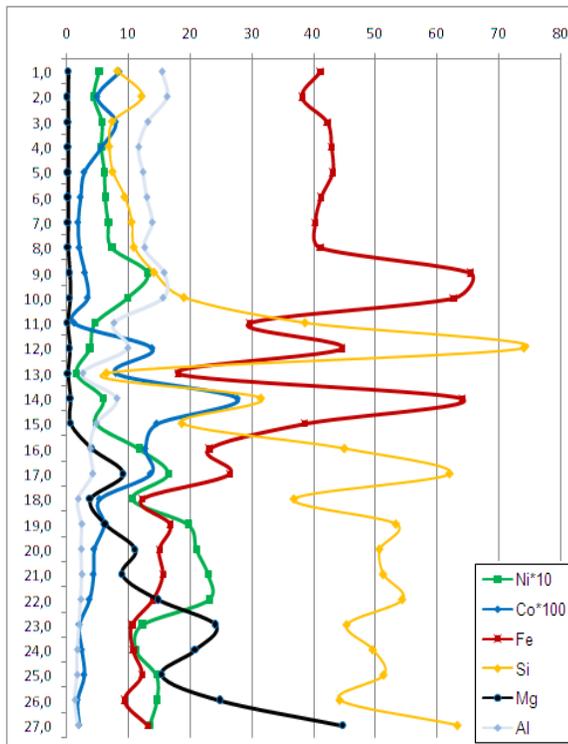


Figura 4.8.4. Geoquímica del Pozo N4.4E10.6.

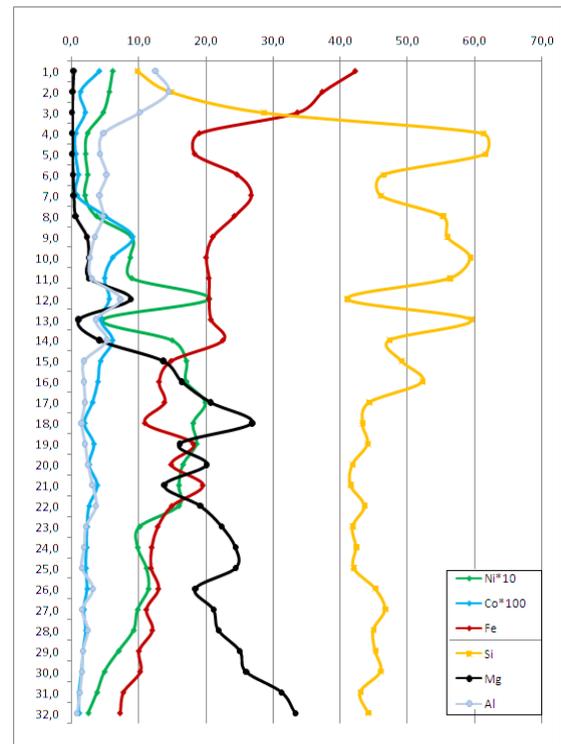


Figura 4.8.5. Geoquímica del Pozo N4.5E10.4.

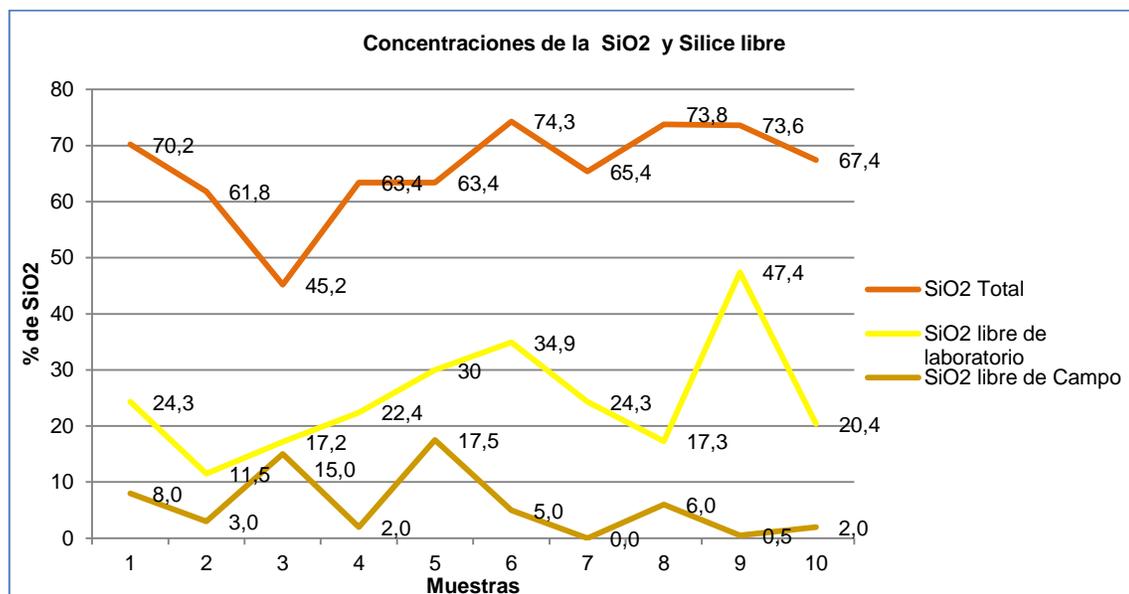
El comportamiento de casi todos los elementos, aunque como tendencia son muy similares a los depósitos del norte oriental, se destaca lo errática de su distribución, con valores altos y bajos.

La geoquímica de la corteza de intemperismo es como tendencia similar a la de las cortezas en general, los elementos como el hierro (Fe) y el magnesio (MgO), que son indicadores importantes del intemperismo, con un comportamiento inverso entre ellos en el perfil, en San Felipe, aun cuando mantiene esa tendencia se observan particularidades que lo diferencian de lo que sucede en un perfil clásico. Detallaremos brevemente los elementos químicos promediados por horizontes para el total de muestras con determinaciones químicas en el depósito y su comportamiento en el perfil.

Distribución de la sílice

La sílice libre se distribuye inusualmente por todo el perfil de intemperismo de San Felipe, tanto en profundidad como arealmente, esta distribución no está sujeta a regularidades fácilmente identificables, la documentación de la sílice libre en los testigos de perforación durante los trabajos de campo no estuvo nunca exenta de subjetivismo a la hora de su cuantificación en por ciento, pues hubo la posibilidad de no identificar fragmentos que quedaran embebidos en la masa de ocre o arcillas.

Para mostrar con mayor claridad la distribución de la sílice libre determinada visualmente, tomamos en cuenta también la sílice libre determinada en el laboratorio y se tomó en consideración el porcentaje de recuperación del testigo como un factor de control en su distribución y se reflejan en la siguiente figura conjuntamente con la sílice total determinada en el laboratorio.



Nota: Ver tabla 4.8.1: para la definición de las litologías.

Figura 4. 8. 6. Comportamiento de SiO₂ total y la sílice libre en el perfil de intemperismo.

La distribución de la sílice libre y la sílice química en las diferentes litologías, tienen un comportamiento similar, con una tendencia general hacia la disminución en el perfil en profundidad. A pesar de la omnipresencia manifiesta de la sílice

libre en todo el perfil, se notan tres zonas de acumulación de la misma con los mayores valores en el horizonte limonítico con un ligero descenso hacia el OTL, un ascenso hacia los horizontes OTN y SN y una disminución ligera hacia la base del perfil. La mayor acumulación de sílice libre se localiza espacialmente en la parte central de la meseta y en el extremo noroeste, hacia los lugares más bajos del relieve.

Tabla 4.8.2. Contenidos de sílice libre y SiO₂ total por litologías

Litologías	Código Litológico.	Muestras	Sílice libre en %			SiO ₂ en %		
			Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Coraza	1	119	2	50	26.62	5.53	92	22.83
ONTCP	2	1203	0.1	70	20.16	4.29	80.87	25.99
ONT	3	366	1	70	22.06	4.92	83.73	40.07
OTL	4	613	0.25	70	11.55	5.43	85.53	41.29
OTN	5	1619	0.2	60	16.81	7.64	88.5	46.21
SN	6	2000	1	81	17.22	1.24	83.78	48.63
SL	7	448	0.25	50	8.91	25.52	90.52	46.96
Peridotita Serpent.	81	350	1	40	8.57	2.55	85.7	45.34
Corteza por gabro	84	8	5	5	5.00	48.69	57.32	53.21

Nota: Ver tabla 4.8.1: para la definición de los códigos litológicos.

En el perfil, la distribución de la sílice libre presenta características específicas en las diferentes zonas, que detallamos a continuación:

Zona de limonitas: La sílice libre aparece en forma de fragmentos y bloques de dimensiones variables, de pocos centímetros hasta varios metros, se encuentra también asociada a los bloques de coraza. Son fundamentalmente ópalos de colores amarillos parduzcos, rojizos, verdosos con tonalidades negruzcas en forma dendrítica (por el manganeso), más raramente blanquecinos. En esta zona los contenidos reportados de sílice libre en los pozos varían entre 20-30 %.

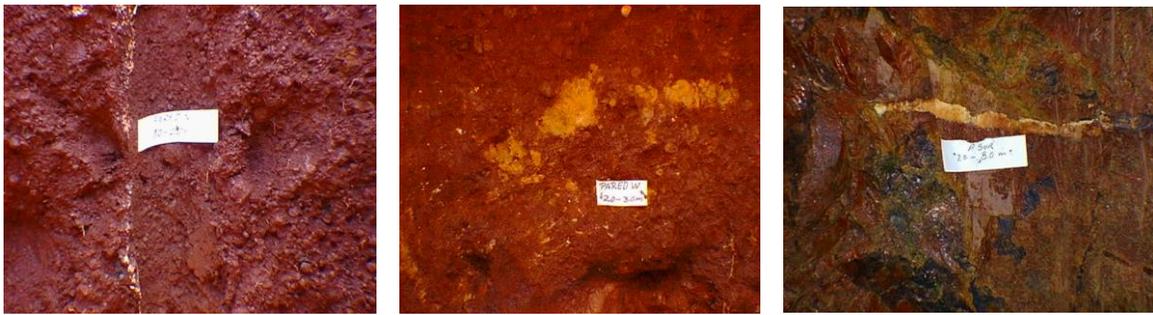


Figura 4. 8. 7. Fotos de las paredes de un pozo criollo con presencia de marshalita.

Subordinadamente aparece la sílice libre pulverulenta (marshalita), la cual aparece en bandas como pseudo estratificaciones en la masa de los ocre no texturales. La marshalita es un fino polvo de sílice de color blancuzco-amarillento como se muestra en la figura 4.8.7, aparece el ocre no textural con perdigones, el ocre no textural, ocre textural limonítico, de izquierda a derecha.

Zona saprolítica. Sílice libre en la masa de las arcillas, en forma de fragmentos (angulosos) de tamaño generalmente pequeño, de unos pocos centímetros, muy raramente en fragmentos que exceden los 10 cm de diámetro. Son esencialmente ópalos de colores verde-amarillento con tonalidades negruzcas debido a las impurezas de manganeso. (Figura 4. 8. 8). En esta zona los contenidos promedio de sílice libre son de entre 10-20 % y las relaciones geoquímicas con la sílice química son completamente armónicas (Figura 4. 8. 6), con curvas con tendencias parecidas, lo que atestigua que nos encontramos en la zona con predominio de los silicatos arcillosos. (horizontes 4, 5, 6, y 7). Aparece en ocre textural nontronítico, serpentina nontronitizada y serpentinas lixiviadas, de izquierda a derecha.



Figura 4. 8. 8. Fotos de las paredes de un pozo criollo con presencia de sílice libre.

Roca. Sílice libre en el basamento rocoso. Aquí los contenidos son inferiores a los de las zonas anteriores y se presenta usualmente como finas vetillas rellenando las grietas prototectónicas de las ultramafitas serpentinizadas (boxwork). Son esencialmente ópalos de colores blancuzcos, verdosos, raramente rojizos; también se observa la formación de calcedonias que sustituyen pseudomórficamente los minerales de la serpentina. Estas calcedonias afloran en algunos lugares en la parte más al noroeste de la meseta donde la erosión expone frecuentemente el lecho rocoso de la corteza de intemperismo. Figura 4. 8. 9. Los contenidos promedio son los más bajos y oscilan entre 0-10 %. Geoquímicamente, aquí los valores de la sílice química o total aumentan mientras que la sílice libre disminuye continuamente.



Figura 4. 8. 9. Fotos de la presencia de sílice libre en fragmentos en superficie (ópalo, cuarzo, calcedonias).

Estudios de los ópalos de San Felipe confirman lo ya mencionado en la evolución del depósito, que estos proceden de la deposición de fluidos saturados en sílice producto del proceso de intemperismo, estos resultados se obtuvieron de estudios realizados con espectrometría Raman, que fueron comparados y validados por difracción de rayos X (DRX), además se utilizó la microscopía electrónica de barrido con analizador de rayos X para determinar los elementos químicos en cada muestra. Milia et al (2015).

Distribución del Fe y Co

El Fe y el Co se distribuyen en el perfil de intemperismo de San Felipe, como usualmente en las cortezas de intemperismo, disminuyendo sus contenidos de los

horizontes superiores a los horizontes inferiores. Notándose que las concentraciones de Fe se encuentran por debajo de 35 %, demostrando el carácter saprolítico del depósito y los valores de cobalto alrededor de 0.05 %, concentraciones típicas de estos depósitos de intemperismo.

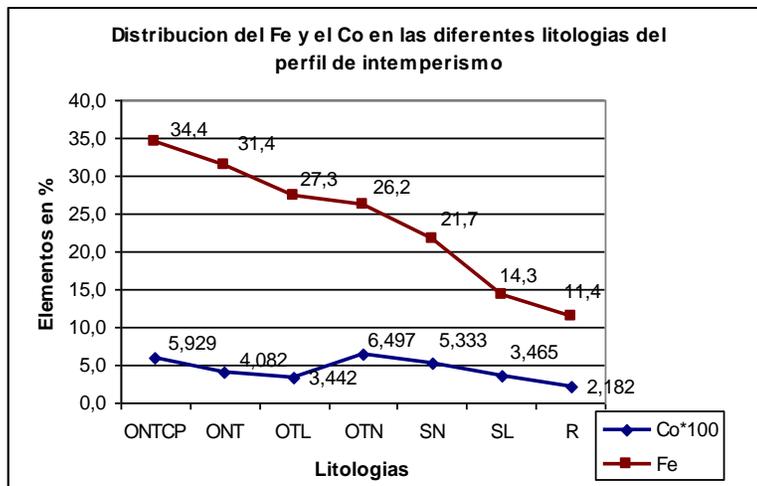


Figura. 4.8.10. Distribución del Fe y el Co en los diferentes horizontes del perfil de intemperismo.

Distribución del Ni y SiO₂

La sílice (SiO₂) y el níquel (Ni) se distribuyen con una tendencia similar en las diferentes zonas del perfil, generalmente si aumenta la sílice, aumenta el níquel, lo que demuestra el carácter silicatado de la mineralización en el perfil de intemperismo.

En el caso de los horizontes superiores (ONTCP, ONT, OTL), la similitud de la tendencia es menos fuerte, manteniéndose el Ni casi estable, mientras que el SiO₂ se incrementa.

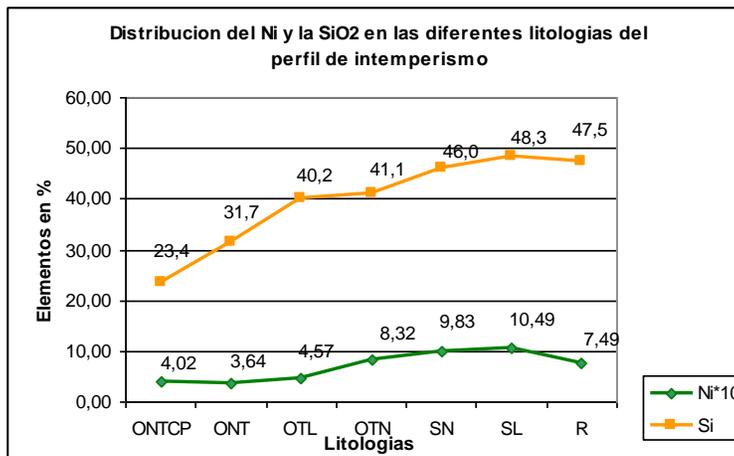


Figura. 4.8.11. Distribución de Ni y SiO₂ en los diferentes horizontes del perfil de intemperismo.

Distribución del Fe y el MgO

Como elementos que definen claramente el intemperismo en las ultrabasitas se evidencia una relación inversa entre ambos, disminuyendo el hierro (Fe) en profundidad y aumentando el magnesio (MgO). En los horizontes de OTL, OTN, comienza el aumento siendo más notorios en las SL y en la R.

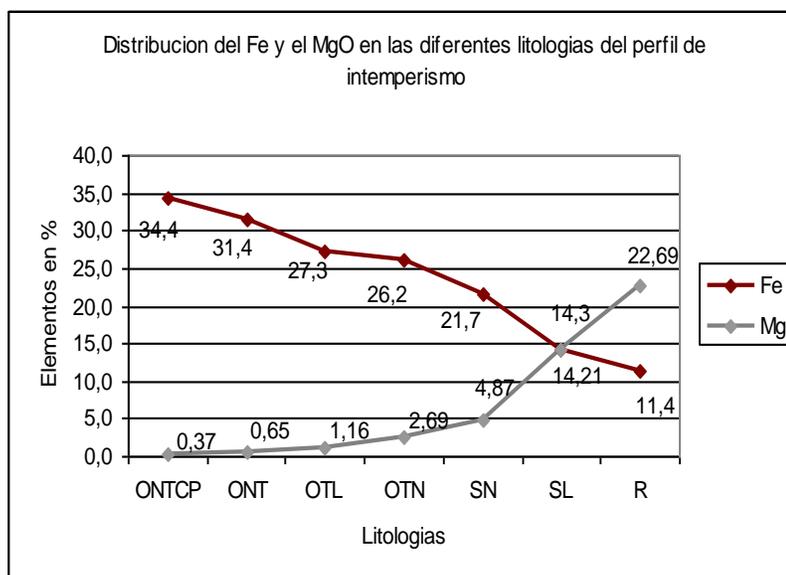


Figura. 4.8.12. Distribución del Fe y el MgO en los diferentes horizontes del perfil de intemperismo.

Distribución del MgO y el Al₂O₃

El aluminio (Al₂O₃) que suele concentrarse en los horizontes superiores, en este caso tiene un comportamiento como es común, con una relación inversa con el magnesio (MgO). El aluminio tiene un comportamiento diferente solo cuando se presentan diques de rocas básicas intemperizadas dentro del perfil de la corteza como se muestra en la tabla 4.8.3, mostrando un comportamiento totalmente errático comparándolo con el perfil de intemperismo que se produce a partir de las peridotitas serpentinizadas.

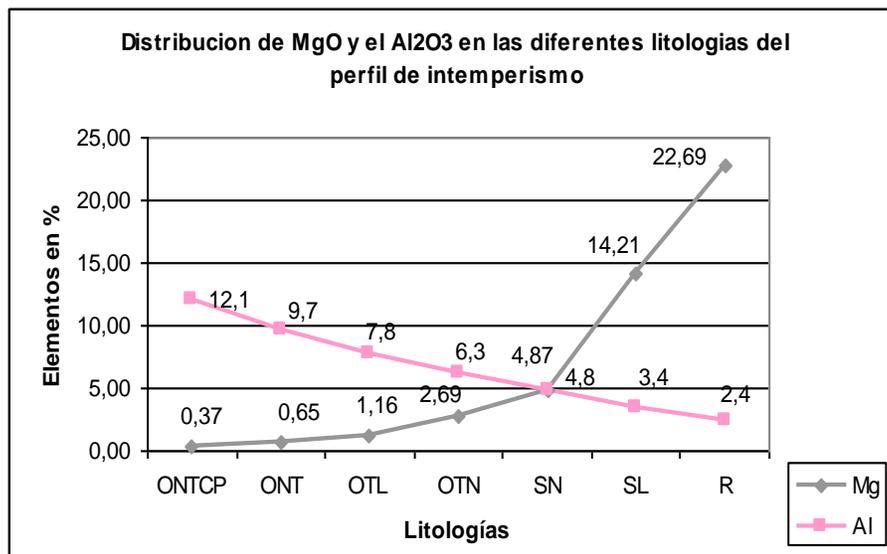


Figura. 4.8.13. Distribución del Mg y el Al₂O₃ en los diferentes horizontes del perfil de intemperismo.

A pesar de que la tendencia general del aluminio (Al₂O₃) es a disminuir en profundidad, en los depósitos de intemperismo es bueno destacar que, en algunas áreas del depósito, aparecen dentro del perfil de la corteza producto de las peridotitas serpentinizadas, intercalaciones de corteza producto de otras rocas (gabro diabasas y gabro), que en ocasiones alcanzan hasta 3 (tres) metros y más. La distribución no mantiene una regularidad en el depósito ni areal ni en profundidad. Ver tabla 4.8.3 del pozo N8.4E11.5 con intercalaciones de corteza por gabro.

Teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de estas intercalaciones, se requiere, una atención especial durante la prospección y exploración para una adecuada evaluación del comportamiento de los elementos en el perfil y para una oportuna orientación de los trabajos mineros. Puede ocurrir, como en este caso, que los horizontes intemperizados a partir de gabro no fueron identificados por el técnico al documentar el testigo, pero es notorio el incremento de los valores de Al_2O_3 y la disminución del Ni, que, cuando al parecer, comenzaba a tener valores apreciables en el horizonte 4, al igual que el Co, estos decrecen a partir del hasta 13 m como lo hace también el Fe y el Cr_2O_3 :

Tabla 4.8.3. Composición química y humedad del Pozo N8.4E11.5

Litología	Hasta (m)	Longitud (m)	Contenidos en %							Humedad natural
			Ni	Co	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	
2	1	1	0,44	0,091	36,5	14,91	0,3	18,29	2,19	13,1
2	2	1	0,38	0,074	36,1	15,87	0,31	16,92	2,62	16,46
2	3	1	0,29	0,04	34,6	22,3	0,29	13,67	3,11	18,28
2	4	1	0,21	0,031	22,9	50,42	0,21	8,95	1,69	14,09
3	5	1	0,23	0,021	20,7	58,14	0,39	6,52	1,29	15,81
3	6	1	0,15	0,017	15,7	67,2	0,29	5,23	1,12	14,62
3	7	1	0,32	0,015	37,6	22,34	0,39	9,27	2,43	17,5
3	8	1	0,26	0,016	34,5	30,05	0,47	7,12	2,26	19,01
3	9	1	0,29	0,02	24,5	48,03	0,37	5,78	1,85	19,88
3	10	1	0,3	0,025	30,1	39,51	0,4	6,12	1,99	23,07
4	11	1	1,01	0,045	29,4	27,86	2,92	12,5	1,54	29,12
4	12	1	0,8	0,078	29,3	30,87	2,43	11,48	1,64	31,11
4	13	1	0,48	0,012	8,4	47,13	4,1	23,93	0,11	35,89
4	14	1	0,64	0,010	8,2	47,97	5,47	23,09	0,11	33,92
4	15	1	0,58	0,010	8,6	44,9	4,76	23,88	0,1	30,23
4	16	1	0,65	0,020	8,2	47	6,95	20,37	0,18	33,73
5	17	1	1,68	0,074	15,4	42,29	9,35	11,01	0,82	38,11
4	18	1	1,03	0,186	32,7	22,88	5,1	8,64	2,6	37,65
6	19,3	1,3	1,60	0,075	30,9	61,5	7,1	4,1	2,24	42,18
6	20,6	1,3	1,56	0,077	28,2	63,9	8,5	3,6	2,24	37,78
6	21,6	1	0,7	0,018	9,4	48,15	26,66	1,82	0,74	29,06
81	22,6	1	1,12	0,011	8,2	42,45	31,73	1,01	0,58	16

Distribución de Ni, sílice y humedad natural

La distribución de estos dos elementos que se grafican en este caso con la humedad natural evidencian claramente el carácter silicatado arcilloso del depósito San Felipe, pues es posible mapear la zona mineral utilizando este parámetro físico –humedad- el cual no se determina usualmente en este tipo de depósito pero brinda una útil información para la caracterización del mineral.

La humedad natural se incrementa de los ocres texturales limoníticos a los ocres texturales nontroníticos en un 10 % aproximadamente y mantiene un incremento notable hasta las serpentinas lixiviadas disminuyendo en las rocas del basamento.

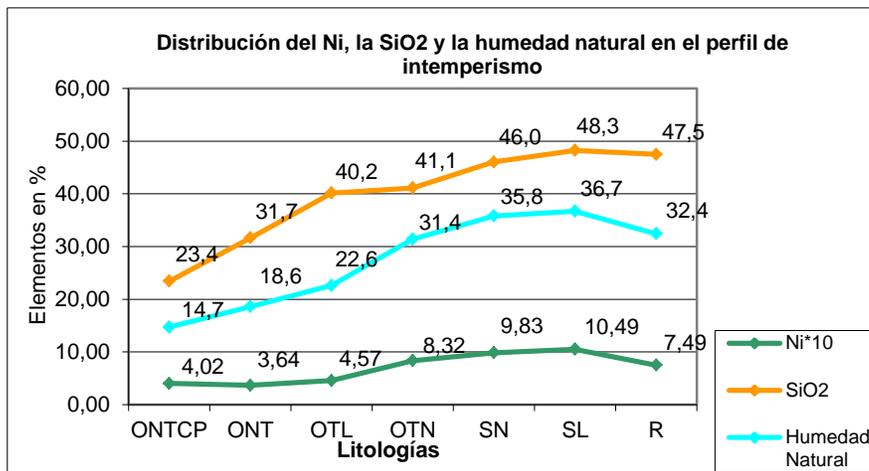


Figura. 4.8.14. Distribución del Ni, SiO₂ y la humedad natural en los diferentes horizontes del perfil de intemperismo

Recomendamos que en estudios de los yacimientos lateríticos se realice la determinación de la humedad natural como un método que dice mucho sobre el desarrollo del intemperismo y del tipo de perfil que predomina en el depósito.

4.8.1 Elementos minoritarios

La caracterización mineralógica y geoquímica del perfil, realizado a partir de 20 muestras representativas de dos pozos, empleando los métodos de DRX, FRX, ICP-MS, SEM-EDS, TEM-AEM, granulometría y microscopía óptica. Incluye

elementos que tienen concentraciones iguales o superiores a 1000 ppm (0,1% en peso). Estos son: Cr, Mn, Ti, P y Ca. El Ni y el Co se analizaron de forma diferenciada por sus concentraciones importantes, Marín et al (2011).

El Cr_2O_3 y MnO (Figura IV.8.1.1) presenta valores bajos (inferiores al 1 % en peso) en prácticamente todo el perfil con una ligera tendencia a aumentar en superficie. Las concentraciones de MnO oscilan entre 0,11 % y 0,95 % en peso. El horizonte que concentra más MnO son los ocres texturales limoníticos, superiores al 0,7 % en peso, seguido de los ocres texturales nontroníticos y el horizonte limonítico, con concentraciones que rondan el 0,4 % en peso. En los demás horizontes las concentraciones son inferiores a 0,2 % en peso.

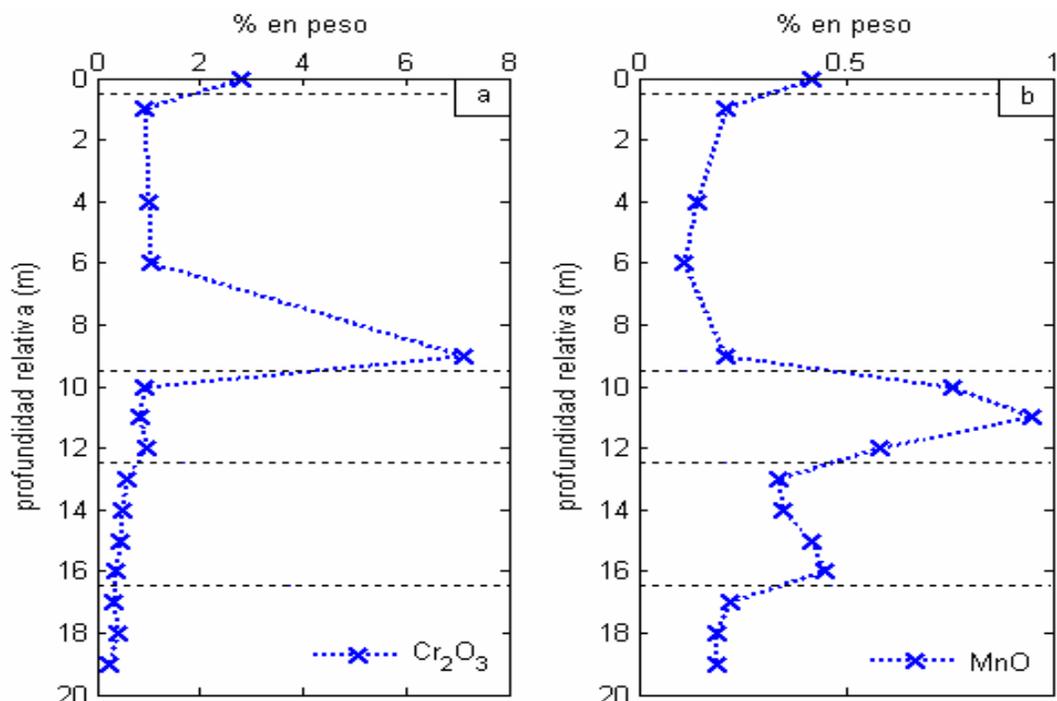


Figura 4.8.1.1. Concentraciones de Cr_2O_3 y MnO en las muestras analizadas

El TiO_2 y el P_2O_5 tienen un comportamiento parecido a lo largo del perfil, las concentraciones son relativamente bajas, aumentando considerablemente hacia la parte superior en el horizonte limonítico: ocres no texturales y parte superior de los ocres texturales limoníticos. (Fig. 4.8.1.2).

Las concentraciones del CaO son bajas, variables y aleatorias en el perfil, oscilan entre 0,03 % y 0,33 % en peso no existiendo tendencia a concentrarse en algún horizonte. Marín et al (2011).

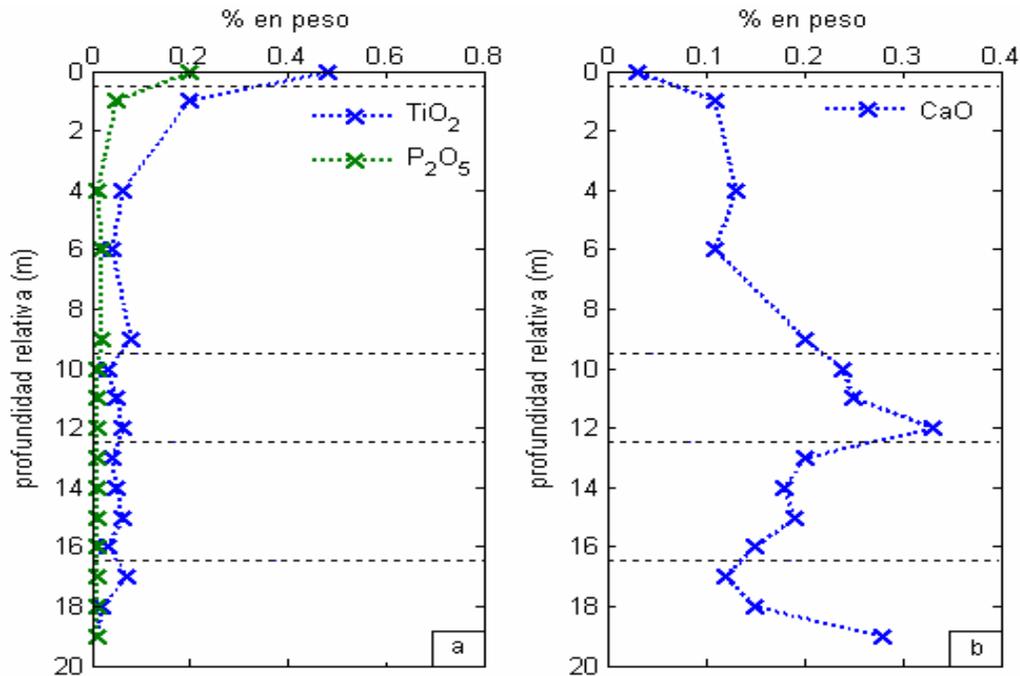


Figura 4.8.1.2 Concentraciones de TiO_2 , P_2O_5 y CaO

4.8.2. Elementos traza y asociación de elementos

A partir de la matriz de correlaciones que se ha generado con las concentraciones de los elementos obtenidas mediante ICP-MS y FRX, se han establecido series de elementos que presentan un comportamiento parecido en el perfil como las tierras raras, Marín et al (2011).

Tierras Raras

Los elementos Lu (lutecio), Yb (iterbio), Tm (tulio), Er (erbio), Ho (holmio), Dy (disproso) y Tb (terbio), tienen un comportamiento parecido en el perfil: se acumulan en las serpentinas nontronitizadas y en los ocreos texturales limoníticos. Los coeficientes de correlación lineal, r , entre los distintos elementos son todos superiores a 0,9, Marín et al (2011).

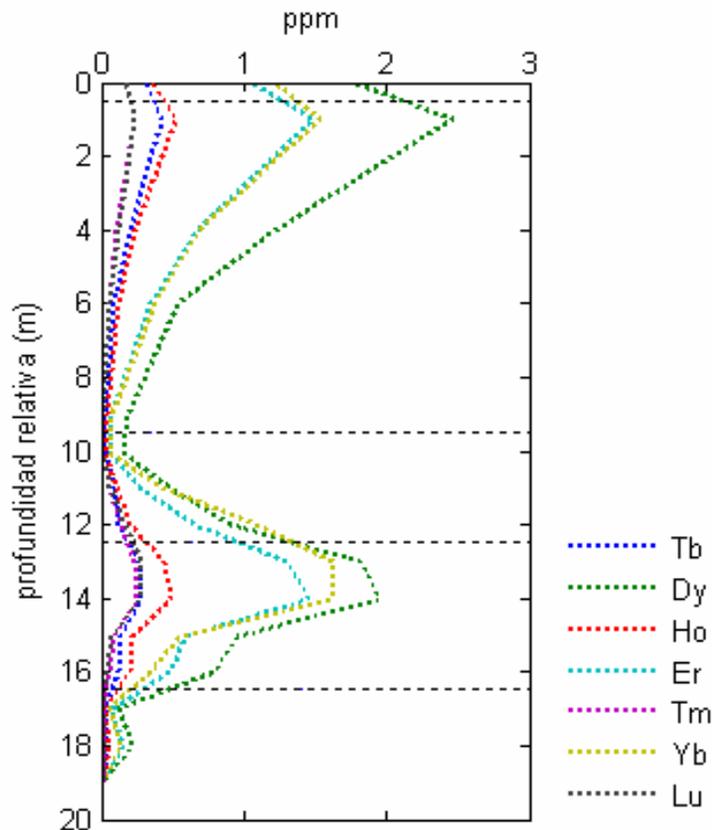


Figura 4. 8.2.1: Variación del contenido de elementos del grupo de las tierras raras a lo largo del perfil en un pozo.

Otros elementos traza

Se ha identificado un conjunto de elementos y/o óxidos, que se localizan en la parte superior del perfil, ocre no texturales y ocre texturales limoníticos. Estos son: Hf (hafnio), Zr (circonio), Rb (rubidio), Cs (cesio), Be (berilio), Ga (galio), Nb (niobio), Ta (tántalo), Mo (molibdeno), Sn (estaño), Tl (talio), Pb (plomo), U (uranio), Th (torio) y Ce (cerio). Los coeficientes de correlación lineal son todos superiores a 0,91.

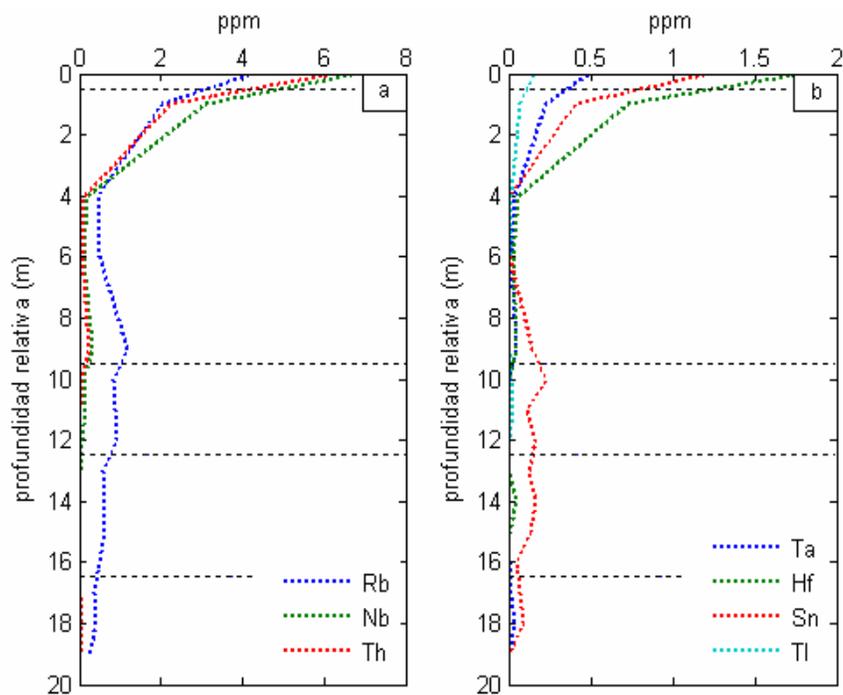


Figura 4.8.2.2: Variación de la concentración de Rb (rubidio), Nb (niobio) y Th (torio) y Ta (tántalo), Hf (hafnio), Sn (estaño) y Tl (talio) a lo largo del perfil laterítico.

4.9. Petrología de rocas ígneas asociadas

El basamento del depósito está representado por rocas de la asociación ofiolítica, con predominio en lo fundamental de la zona de transición o MTZ compuesto por las peridotitas serpentinizadas (harzburgitas, lherzolitas, wherlitas), dunitas y diques de piroxenitas, gabros, microgabros y diabasas. Ver Figura 4.4.4.

Los minerales primarios que constituyen el protolito son esencialmente el olivino y los piroxenos. Ellos proveen la textura primaria, la cual, junto con el agrietamiento protectónico de las ultrabasitas proporcionan la viabilidad para la transferencia de las aguas y en consecuencia el desarrollo del intemperismo. La presencia de otros minerales secundarios como la cromita y eventualmente algunos minerales del grupo de la serpentina como la antigorita, la serpofita y el talco, al ser minerales más estables (temperatura de formación de 450° C) no favorecen la consecución del intemperismo y permanecen generalmente rellenando grietas en las ultrabasitas, Formell (2010) inédito.

4.10. Teoría de formación del depósito

La acción combinada de los procesos exógenos y tectónicos determinaron la formación y evolución de la meseta de San Felipe y consecuentemente las características del perfil de la actual corteza de intemperismo desarrollada sobre las rocas ultrabásicas del macizo ofiolítico, el cual consiste en un perfil de menas esencialmente arcillosas silicatadas (esmectitas, nontroníticas).

Esta combinación de procesos tectónicos y de intemperismo dio lugar a la constitución de San Felipe que se define como una meseta de tipo horst en una zona de antiguos sobrecorrimientos con una interesante morfología que se caracteriza por laderas abruptas al este, noreste y sureste y siguen un alineamiento, de origen con toda probabilidad tectónico; al noroeste desciende de forma muy suave hasta alcanzar el nivel del peniplano general dándole a la meseta en realidad una forma en perfil de una cuña extendida.

El límite oeste coincide, sin dudas, con la falla de sobrecorrimiento que limita el terreno de corteza oceánica, del terreno de arco de islas volcánico, el cual cabalga a las ultrabásitas con un ángulo suave que no sobrepasa los 30°, el límite este, bien pudiera ser otro antiguo manto interior de bajo ángulo dentro del terreno de corteza oceánica; ambas fallas fueron rejuvenecidas durante la etapa neotectónica de estilo tectónico germánico. El límite sur, sin embargo parece coincidir con una falla normal de dirección NE, de origen puramente neotectónico, Formell (1998).

Una característica notable derivada de los complejos procesos que rigieron el origen y evolución de San Felipe es la amplia distribución de sílice libre a lo largo y ancho de la meseta y en profundidad. Aparentemente parece no haber regularidad en la distribución espacial de la sílice libre, sin embargo, si prestamos un poco de atención vemos que pueden establecerse algunas regularidades sobre la base del examen realizado tanto de afloramientos como de la información obtenida de los pozos de perforación.

Se presenta una mayor concentración de sílice libre hacia los bordes de la meseta y también en el centro geográfico de la meseta, formando un anillo concéntrico alrededor de ese centro, esto fue confirmado a través de observaciones de campo. Estas regularidades del desarrollo de sílice libre y también el desarrollo de la coraza de hierro se encuentran relacionadas con las características del relieve, lo cual se confirma con el plano de pendientes y de la interpretación realizada a partir de las fotos aéreas pancromáticas a escala 1:64 000 de 1955, con la ventaja de que en esa época la meseta de San Felipe se encontraba prácticamente deforestada, por lo que los rasgos del relieve y el microrelieve asociados a la estructura geológica son perfectamente discernibles, (Figura 4.4.1). Formell y Cobas (1998, 1999).

El mayor desarrollo de coraza se encuentra en zonas bajas que constituyen intradepresiones dentro de la meseta, las cuales frecuentemente forman lagunas temporales en la época de lluvia. En esos lugares las pendientes son menores de 5°. Por otra parte, la aparición de sílice libre está asociada con la presencia de intraelevaciones del relieve.

La sílice distribuida en todo el perfil de la corteza en el depósito de San Felipe está representada por fragmentos de diferentes tamaños, hasta bloques. Aparecen ópalos que varían de color: rojo pardo, blanco, verde, amarillento, notándose un aumento de los volúmenes y tamaño de los fragmentos hacia la periferia de la meseta. Otro rasgo a destacar, además de la presencia de bloques de coraza de hierro en la superficie y cercano a la superficie, atravesadas durante las perforaciones, aparecen también, muy abajo en el perfil en el seno de las serpentinas nontronitizadas. Estos elementos de por sí, apoyan fuertemente la hipótesis de que en San Felipe se observan dos generaciones de desarrollo de cortezas de intemperismo en las rocas ultramáficas.

- Una más antigua representada por los relictos de sílice libre en forma de ópalos que se desarrollan prácticamente por doquier y también por

fragmentos de coraza de hierro que se encuentran a profundidad en el perfil actual de la corteza.

- Otra más joven, que constituye las menas actuales y que se habría desarrollado sobre los relictos de la antigua corteza de intemperismo que fue lavada y erodada.

El perfil de intemperismo que se observa en San Felipe es esencialmente un perfil completo, generalmente complejo por la presencia de sílice libre y alcanza grandes potencias. El mismo se caracteriza por abundante sílice libre, con una frecuente variabilidad de las potencias, tanto del escombros como de la zona mineralizada y por ende de las relaciones entre ellos, no sujeta a ninguna regularidad.

En algunas áreas, hacia la periferia de la meseta, se nota una concentración de pozos no mineralizados y un aumento significativo de los contenidos de sílice libre a lo largo del perfil, así mismo la zona de la apófisis de la meseta y los bordes tienen abundante presencia de coraza de hierro. Todo esto nos permite considerar la existencia de una larga barrera silíceas bien desarrollada en la periferia de la meseta de San Felipe la cual estaría dificultando la normal transferencia de las aguas subterráneas. Formell et al (1998).

Esta circunstancia explica de manera satisfactoria la presencia en San Felipe de un perfil menífero esencialmente arcilloso silicatado y la presencia en este perfil de cantidades de sílice libre que habría sido precipitada a partir de las aguas saturadas de sílice debido a las difíciles condiciones de la transferencia de las aguas. Esta sílice libre se acumula a lo largo del perfil, en los horizontes de los ocre no texturales, en los horizontes de las serpentinitas nontronitizadas y lixiviadas y en las serpentinitas desintegradas. En las partes superiores del perfil se representan por fragmentos de diferentes tamaños y grados de redondeamiento, sueltos o aglomerados con pisolitos de hierro o sílice colomorfa y en los horizontes inferiores predomina la sílice libre relleno las grietas

prototectónicas de las ultrabasitas, las grietas de la red reticular de la textura de las ultrabasitas y otras zonas de debilidad tectónica como zonas de cizalla así como también en fragmentos de variadas formas y tamaños. Formell et al (1998, 1999).

La presencia de las aguas subterráneas en los pozos perforados permite separar áreas con agua y áreas secas lo que sugiere que estamos ante un lecho irregular, con bolsones que pudieran contener acuíferos independientes con poca comunicación entre ellos.

El análisis de estas regularidades geológicas observadas en el depósito de San Felipe permite identificar **tres fases de silicificación** con una distribución espacio-temporal muy clara. Formell et al (1998).

- I. Una primera y más antigua fase de silicificación relacionada con la antigua corteza de intemperismo de tipo bolsón distribuida preferentemente en las partes inferiores del perfil, en la cual el régimen de difícil transferencia de aguas posibilitó la precipitación de la sílice en solución hacia allí, rellorando las zonas de fallas y grietas prototectónicas de las serpentinitas, eventualmente, también en forma de bloques o fragmentos caóticamente distribuidos en la masa de la corteza actual. Esta sílice libre se conservó durante los procesos ulteriores de erosión regional como testigos raíces de esta antigua corteza de intemperismo y contribuyó a la modelación del relieve positivo que resultó al actuar esta sílice como barrera protectora a esos procesos de erosión.
- II. Una segunda fase relacionada con la creación de un nuevo relieve positivo a partir del lavado y erosión de la antigua corteza de tipo bolsón que creó nuevas condiciones de transferencia de las aguas, las cuales, a pesar de continuar siendo difíciles debido a la existencia de las barreras silíceas que formaron un relieve positivo, pero ondulado y a la continua poca diferencia de nivel entre las zonas de alimentación de las aguas y las zonas de descarga,

tenía salida hacia los bordes de la meseta donde la sílice contenida en solución en las aguas sobresaturadas nuevamente precipitaba, pero ahora, hacia los bordes de la meseta, creando una nueva barrera perimetral de sílice que contribuyó a dificultar aún más la transferencia de las aguas y a crear las condiciones para la formación de una nueva corteza de intemperismo de tipo bolsón. Esta sílice se distribuye preferentemente hacia la periferia de la meseta en forma de masas y bloques de silcreta y silferricreta creando una barrera perimetral silíceas en el depósito de San Felipe.

- III. Una tercera fase ocurrida durante el desarrollo de la actual corteza de intemperismo favorecida por la formación de la barrera silíceas perimetral. Durante la misma, nuevamente la circulación de las aguas subterráneas que han continuado siendo de difícil transferencia con compartimentación espacial en pequeños bolsones limitados por barreras de sílice antigua, distribuidas según el sistema de agrietamiento prototectónico de las ultrabasitas, crearon condiciones para la precipitación de sílice en las partes centrales de la meseta. Esta sílice a diferencia de la sílice antigua de la primera fase de intemperismo se acumula preferentemente ahora en la masa de las limonitas y nontronitas.

4.10.1. Fuentes de níquel y de cobalto

Los depósitos saprolítico-lateríticos son depósitos supergénicos que se forman por el intenso intemperismo esencialmente químico de las rocas ultramáficas. San Felipe se forma a partir de la omnipresencia de la meteorización química y mecánica de las peridotitas serpentinizadas desarrolladas en la región de Camagüey.

Los minerales portadores de níquel fundamentalmente son las esmectitas, representadas por las nontronitas, montmorillonitas, además aparece el níquel en menor cantidad en la lizardita y minerales de óxidos de hierro.

Los minerales portadores de níquel y cobalto identificados, que se encuentra fundamentalmente como inclusiones dentro de los alumino-silicatos (arcillas), silicatos de magnesio (serpentina) y en menor proporción asociados con las cromitas y los óxidos de manganeso fueron: esmectitas, limonitas, serpentininas, óxidos de manganeso, los minerales de níquel presentes son: silicato de níquel, cromitas níquelíferas y en menor proporción los cloratos de níquel hidratados. Cabrera et al (2005).

4.11. Guía para la exploración de recursos

La formación de las cortezas de intemperismo de níquel y cobalto están sujetas a la existencia de las rocas ofiolíticas y a la interacción de varios factores sobre ellas. Una variedad de técnicas tradicionales para comprender la geología es empleada para su localización y estudios. Entre ellos se destacan sensores remotos, geofísica de superficie de alta resolución y métodos de penetración pueden identificar las secuencias ofiolíticas las que contienen peridotitas, dunitas con diferentes grados de serpentinización, etc.

4.11.1. Geología y geofísica

La interpretación de fotos aéreas e imágenes satelitales para la detección de las condiciones geomorfológicas propicias para el desarrollo de estas cortezas de intemperismo es una de las técnicas a aplicar para definir las áreas y extensión de desarrollo de estos depósitos. La aplicación de técnicas geofísicas ayudan a definir su profundidad y su extensión, pues las características físicas de la rocas tienen una respuesta ante los diferentes métodos, lo que permite evaluar su potencia y extensión, la presencia de fragmentos no intemperizados, las intercalaciones de otras rocas como el gabro dentro del macizo, etc. Entre los métodos geofísicos que más información brindan a diferentes escalas están el método de Georadar, métodos magnéticos, SEV-PI, etc.

4.11.2. Geoquímica

La geoquímica de suelo y de sedimentos ha ayudado al descubrimiento de los depósitos lateríticos de Ni y Co. Este depósito tiene además la característica geoquímica que posee concentraciones de Fe, Mg, Ni, Cr, Co y Mn, y otros elementos minoritarios, además posee una concentración anómala de sílice. Aparecen en concentraciones muy bajas elementos de las tierras raras, donde se requiere de la aplicación de técnicas modernas para lograr identificar estos elementos en las etapas de prospección y exploración y así evaluar las potencialidades económicas de este depósito.

4.12. Gráfico tonelaje ley

En el gráfico se muestra la correlación del tonelaje con las concentraciones de Ni.

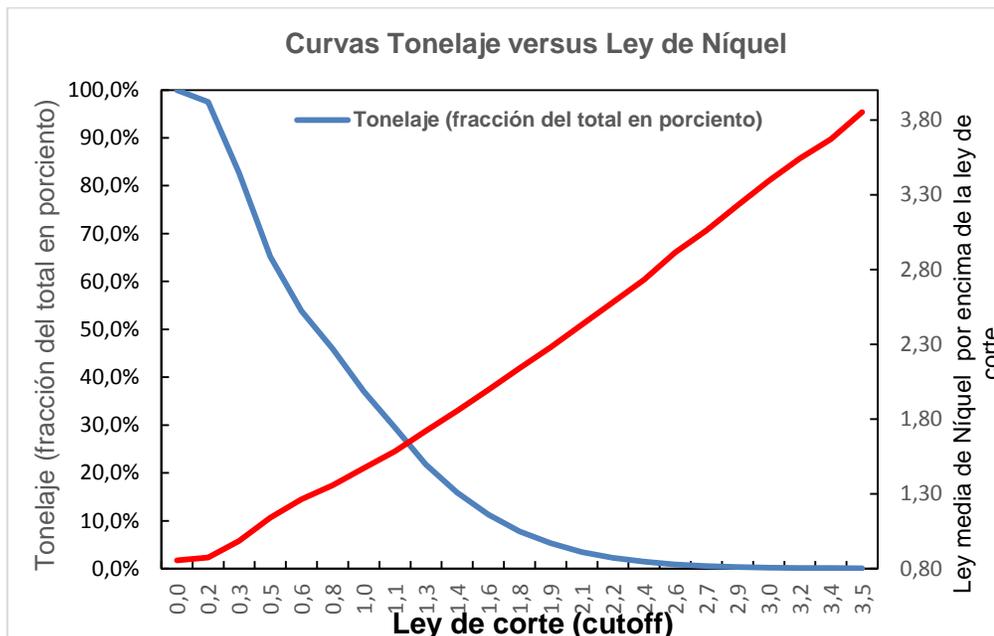


Figura 4.12.1. Gráfico Tonelaje Ley del depósito San Felipe.

Los contenidos de Ni en los depósitos de cortezas de intemperismo no alcanzan altas concentraciones, en el caso de San Felipe, más del 80 % de las muestras poseen un valor de Ni por encima de 0.8 %, dando una ley media de aproximada de 1.6 % de níquel, considerándose un depósito potencial para la extracción de Ni.

4.13. Resumen del modelo geológico descriptivo saprolítico laterítico de Ni y Co

Nombre: Depósito San Felipe

Por: Rosa María Cobas Botey

Descripción: Depósito de corteza de intemperismo in situ, desarrollado sobre peridotitas serpentinizadas, rico en níquel, esta mineralización está controlada por esmectitas, nontronitas y otras.

Referencia General: Formell, Cobas (1998,1999, 2000).

Ambiente Geológico

Tipos de rocas: Rocas ultrabásicas, particularmente peridotitas, dunitas y peridotitas serpentinizadas.

Rango de Edad: Mioceno Superior –plioceno pleistoceno.

Ambiente Depositional: Fuerte intemperismo químico (clima cálido y húmedo), en zonas de fallas con formación de cortezas de tipo bolsón. Intensos procesos erosivos que lavaron esa corteza, inversión del relieve y formación de una nueva corteza sobre las raíces de la antigua corteza. Presencia de abundante sílice libre.

Escenario Tectónico: Protrusiones de rocas de la corteza oceánica emplazadas en frío como resultado de colisión y cizallamiento de rocas de arco de islas volcánicas contra una placa continental. Melange ofiolítico.

Tipos de depósitos asociados con las rocas ultrabásicas: Cromitas podiformes, placeres del grupo del platino y posiblemente tierras raras, asbestos encajados en serpentinitas.

Descripción del depósito

Mineralogía: Arcillas esmectíticas, cuarzo y goethita

Textura y estructura: Horizonte de perdigones en la parte superior del perfil. Abundante sílice libre relleno de las grietas prototectónicas de las serpentinitas en red reticular pseudoofítica. Cambios graduales de un horizonte a otro con presencia de fragmentos de sílice libre en cantos y en polvo en todo el perfil de la corteza.

Zonas de alteración: De arriba hacia abajo, Ogres no texturales limoníticos con y sin perdigones, ogres texturales limoníticos como zona de transición intermedia con las saprolitas, los valores de níquel en estas tres zonas o zonas de las limonitas tienen unos contenidos de níquel entre 0.4 % y 0.8 %. Más abajo aparecen los ogres texturales saprolíticos, las serpentinitas nontroníticas y las serpentinitas lixiviadas, con valores de níquel de las zonas superiores a las inferiores de 0.98, 1.05 y 0.75. %. Dentro de la masa en todas las zonas aparecen fragmentos de Sílice, ópalo y calcedonias, aparece también marshalita o sílice pulverulenta. Esta última zona transiciona a la roca más fresca que mayormente aparece muy fracturada y agrietada.

Control de las menas: Las menas de níquel están controladas fundamentalmente por las esmectitas. Los minerales útiles representados por aluminosilicatos del grupo de las esmectitas (nontronita y poca montmorillonita), óxidos de hierro (hematita, goethita, Trevorita), serpentina, clorita, sílice amorfa, cromita y cuarzo concentrándose, por lo general, en las fracciones finas, se encuentran en un 65-82% de la masa total de las muestras. El mineral nontronítico del depósito San Felipe contiene 1,62% Ni, la montmorillonita contiene 2,00% Ni, el mineral serpentínico 2,4%, la clorita férrica contiene 2,23% Ni, los óxidos y oxihidróxidos de Fe 2,73% Ni.

Intemperismo: El perfil desde los ogres rojos pardos con perdigones hacia abajo a los ogres no texturales, más abajo, los ogres texturales, después las saprolitas con arcillas esmectíticas y finalmente las serpentinitas lixiviadas y desintegradas.

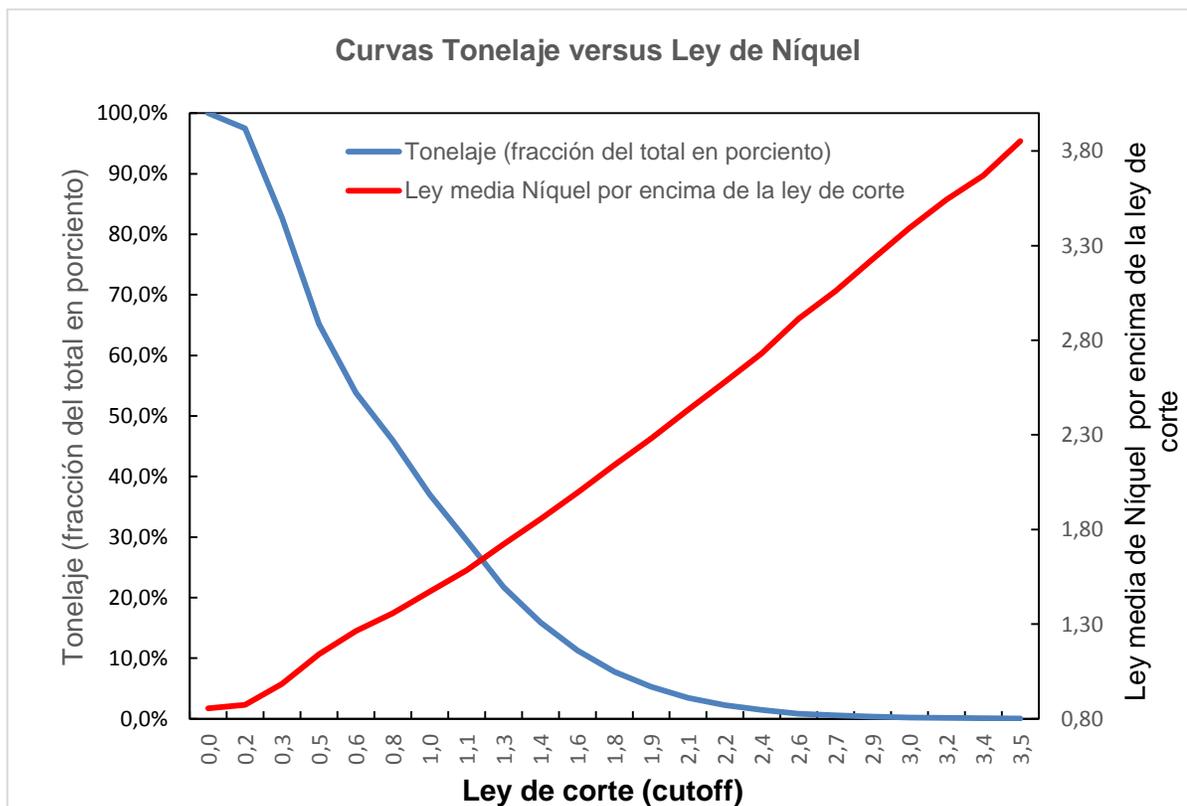
Geoquímica: Enriquecido en Ni, Co, aparecen otros elementos que pudieran ser estudiados como tierras raras y elementos dispersos. Los valores de MgO son

más bajos que en las peridotitas frescas, a pesar de que ha sido objeto de un fuerte intemperismo químico, no son tan bajos producto del mismo proceso de formación y desarrollo del depósito.

Ejemplos de depósitos: Shevshenko, Kazasjtan
Murrin Murrin, Australia

Tonelaje Ley

En las curvas tonelaje ley de Ni del depósito San Felipe, se observa que los contenidos de Ni en los depósitos de cortezas de intemperismo no alcanzan altas concentraciones, en el caso de San Felipe, más del 80 % de las muestras poseen un valor de Ni por encima de 0.8 %, dando una ley media de aproximadamente 1.6 % de Ni, considerándose un depósito potencial para la extracción de Ni.



CONCLUSIONES

1. Se confeccionó el modelo geológico descriptivo del depósito San Felipe, que se realiza por primera vez en Cuba y cumple con las tendencias actuales de los servicios geológicos del mundo.
2. El modelo geológico descriptivo de San Felipe es de utilidad práctica pues en él se establecen las guías para la exploración, se emplea para la evaluación y estimación de sus recursos, para el diseño minero tecnológico, para la investigación y para la formación de profesionales.
3. Se caracterizó el corte geológico del depósito San Felipe destacándose su carácter arcilloso, lo que hace que sea único de este tipo en Cuba, con la presencia de las esmectitas (nontronitas, nepuitas, monmorillonitas, etc.) las cuales controlan principalmente la mineralización de Ni.
4. Se describen los rasgos geoquímicos del depósito; se destaca la presencia de la sílice en todo el corte, tanto libre en forma de ópalos, calcedonias, marshalita y también química. Estas concentraciones proceden de la deposición de fluidos saturados en sílice producto del mismo proceso de intemperismo esto debe tenerse en cuenta durante la explotación y sobre todo a la hora de definir el proceso tecnológico a emplear.
5. En el modelo se establecen las particulares geológicas de San Felipe que lo hacen diferente de los demás depósitos lateríticos cubanos:
 - a. Depósito tipo arcilla.
 - b. El control de la mineralización de Ni fundamentalmente es por las arcillas esmectíticas (nontronita, nepuita, monmorillonita, etc.).
 - c. Presencia de sílice libre y química con concentraciones que oscilan entre 5 a 30 % y entre 20 y 55 %, respectivamente.
 - d. Perfil de intemperismo completo que se torna complejo por la presencia de la sílice indeseada.

- e. Es un depósito tipo bolsón, con dos etapas de desarrollo de la corteza de intemperismo, después de una inversión del relieve por erosión se convierte en una meseta relicto tipo horst.
 - f. Es el depósito laterítico más antiguo de Cuba, de edad Mioceno Superior –Plioceno Pleistoceno.
6. Se encontraron nuevas fases minerales de Ni no reportadas anteriormente en San Felipe que fueron: la trevorita y la ernieniquelita y se encuentran fundamentalmente como inclusiones dentro de la nontronita, óxidos de manganeso, óxidos de hierro y serpentina.

RECOMENDACIONES

1. Que la industria del níquel tenga en cuenta la información sistematizada en este modelo geológico descriptivo para elevar el conocimiento geológico del depósito San Felipe, evaluar sus recursos y la calidad de los mismos garantizando el desarrollo de la minería, el procesamiento de este mineral y su adecuada inclusión en los volúmenes de recursos lateríticos ferro cobalto níquelíferos con que cuenta el país.
2. La sistematización de la información en un modelo geológico descriptivo debe convertirse en una práctica durante los trabajos de prospección y exploración, por lo que recomendamos la utilización de este formato para la elaboración de modelos geológicos descriptivos de depósitos.
3. Tratar y tener en cuenta de forma independiente para cualquier trabajo futuro los gabroides pues no concentran mineralización de Ni y pueden, durante trabajos mineros y tecnológicos diluir el mineral.
4. Determinar y estudiar la humedad natural dentro de los parámetros evaluados, lo cual debe ser empleado para ayudar a definir la zona de mineralización.

Referencias Bibliográficas

- Adamóvich A, *et al.* Mapa geológico a escala 1:50.000 de la Zona Moa, Provincia Oriente. Inédito. Oficina Nacional de Recursos Minerales, 1962.
- Adamóvich A, *et al.* (). Mapa geológico de Pinares de Mayarí-Nicaró, a escala 1:250.000, Provincia Oriente. Inédito. Oficina Nacional de Recursos Minerales, 1963.
- Alexander K, Herrington R, Kirk C & Chlup D. Geology and mineralogy of the Shevchenko Lateritic Ni-Co deposit, Kazakhstan, in: Andrew, C.J. *et al.* (eds). Proceedings of the ninth biennial meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Dublin, Ireland 20th-23rd August 2007, Irish Association of Economic Geology, Dublin, Abstract. ISBN [0-950989-4-4] 1393-1396, 2007.
- Anthony Carpi, Ph.D., Anne E. Egger, Ph.D. "Métodos de investigación. La Práctica de la Ciencia," Vision learning Vol. POS-2 (1s), http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=148&l=s, 2008.
- Ariosa Iznaga J. D., Díaz Martínez R. Modelos de Yacimientos Minerales: Tipologías y Aplicaciones, Revista Minería y Geología Vol. XVII I, No. 2, 2001.
- Ariosa Iznaga J. D. La modelación Descriptiva de Yacimientos Minerales en Cuba. Departamento de Geología. Facultad de Geología ISMM Moa. Holguín, 2002.
- Barcza Nic. The Development of Chrome and Nickel Projects in Kazakhstan & Russia. Oriel Resources Ltd. A Chrome Nickel & Ferroalloy Growth Company. www.orielresources.com, 2009.
- British Columbia Mineral Deposit Profiles. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. List by Deposit Group. [http://www.empr.gob.bc.ca/Mining/Geoscience/MineralDepositProfiles/ListbyDepositGroup/Pages/default.aspx\[2010-05-06](http://www.empr.gob.bc.ca/Mining/Geoscience/MineralDepositProfiles/ListbyDepositGroup/Pages/default.aspx[2010-05-06), 2010.

- Brant N.W, Butt C.R.M., and Elias M. Nickel Laterites: Classifications and features. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(4), 81-88. Commonwealth of Australia, 1998.
- Bugelsky, Y. Y.; Formell C., F. Geoquímica e hidrogeoquímica de la corteza de intemperismo ferroniquelífera de Cuba. Serie Geológica No 3. Instituto de Geología. Academia de Ciencias de Cuba, 1967.
- Cabrera Díaz I., Montejo E., Rodríguez J. et al. "Estudio comparativo de la composición sustancial mineralógica de muestras tecnológicas del yacimiento San Felipe Mining S.A. Boletín N° 5 Grupo Informático CIPIMM. Págs. 20-27, 2005.
- Cabrera Díaz I., Alonso J.A., et al. Evaluación de los minerales portadores de níquel en ultrabasitas del peniplano Camagüey y comparación con depósitos del Macizo Moa Baracoa. I Congreso de Minería, II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas niquelíferas. Memorias, 2005.
- Capote, C., A. I. Llanes, D. De la Nuez, I. Milia, R. Lavandero, L. Gómez, I. Altarriba. Tema 6-276: Evaluación del potencial de lateritas niquelíferas en los sectores Pico Galán, Minas y Puriales, Provincia Guantánamo. Instituto de Geología y Paleontología. Inédito. Archivo IGP. 109 p, 2009.
- Capote C, Yu. M. Arseniev, N. Kalachov. Esquema de Interpretación Fotogeológica, a escala 1:50.000. Tema 2802: Estructura de los Macizos Pinares de Mayarí-Moa-Baracoa. Problema Principal estatal 028: Cortezas de intemperismo niquelíferas y bauxíticas de Cuba. Inédito. Archivo. IGP, 1984.
- Cobas B. R. M., W. Lavaut C., Despaigne B. N. Modelos geológicos de yacimientos lateríticos cubanos. Tercer Congreso de Geología y Minería, Geomin 98, La Habana, Cuba, 1998.

Cobas B., R. M., Despaigne B., N. Yacimientos niquelíferos del norte oriental cubano. Caracterización geológica, Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano. Memorias GEOMIN, 2003.

Cobas B. R. M. Caracterización geológica de las lateritas en diferentes regiones metalogénicas. Comparación de los Yacimientos San Felipe y Piloto. I Congreso de Minería, II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas niquelíferas. Memorias, 2005.

Cobas B., R. M. Modelo Geológico Descriptivo del Yacimiento Laterítico San Felipe. Camagüey, Cuba. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 2007.

Cox D. P. and Singer D. A., Editors. Mineral Deposit Models. U.S. GEOLOGICAL SURVEY BULLETIN 1693, 1986.

Chang Rodríguez A. Caracterización geólogo-geoquímica y mineralógica del Yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe Provincia Camagüey. I Congreso de Minería, II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas niquelíferas. Memorias, 2005.

Chang Rodríguez A. et al. Reporte sobre la alúmina y diques gabroides en el depósito laterítico San Felipe. I Congreso de Minería, II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las lateritas niquelíferas. Memorias, 2005.

Chang Rodríguez A. Geoquímica y mineralogía de saprolitas niquelíferas asociadas a la corteza de intemperismo en el macizo ofiolítico de Camagüey: Caso de estudio yacimiento San Felipe. Tesis Doctoral. Departamento de Geología. Facultad de Geología y Minería, ISMM Moa, Holguín 2016.

Cummings y Miller. 1911. Bull. 340, U.S.G. p 324, 1908.

Cruz Baranda S. Metodología de la Investigación Científica. Centro de Estudios de la Educación Superior, Universidad de Oriente, 2000.

Dennis P. Cox, Donald A. Singer, Eduardo A. Rodríguez, Editores. Modelos de Yacimientos Minerales. United States Department of the Interior Geological Survey Open File Report 87-486, 1987.

Díaz Cisnero, L.R. "Regionalización climática general", en: *Atlas de Camagüey*. Ed. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba y el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía., La Habana, Cuba, 1989.

Díaz Cisnero, L.R. Mapa de regionalización climática general, escala 1:2 000 000. En Nuevo Atlas Nacional de Cuba, Instituto de Geografía, La Habana-Madrid-Cuba, 1989.

Escobar Loret de Mola Eugenio. Empresa Geominera de Camagüey Meseta de San Felipe. (Lateritas ferroniquelíferas). Inv. 4768, Oficina Nacional de Recursos Minerales, 1994.

Figueras M. y Urra Abaira J. Reporte Técnico del recálculo del sector Zona A oeste usando la red de explotación con la actualización del estimado de recursos y reservas. Subdirección de Minas, Moa Nickel S.A., 2013.

Finkó V. I., I. Z. Zorín, F. Formell Cortina. Sobre la edad de la corteza de intemperismo y las lateritas de Cuba. Revista de Geología, Año 1, No. 1. Academia de Ciencias de Cuba. 29-48, 1967.

Formell F., Buguelsky Y. Sobre la Existencia en Cuba de Lateritas Ferroniquelíferas Redepositadas Sobre Calizas. En: Instituto de Geología y Paleontología. Contribución a la Geología de Cuba. -- La Habana: Academia de Ciencias de Cuba. P. 117-139. Publicación Especial, 1974.

Formell C., F. Clasificación morfogenética de las cortezas de Intemperismo niquelíferas sobre las rocas ultrabásicas de Cuba. Ciencias de La Tierra y del Espacio. No. 1. 33-49, 1979.

Formell C., F., J. Oro. Sobre los procesos de redeposición en el yacimiento Punta Gorda. Publicación Ciencias de la Tierra y el Espacio. N. 2, p. 53-66, Cuba, 1980.

Formell C., F., Cobas R. M., Ravelo R., Baryolo L., González V. Programa de perforación orientativa Primera Fase proyecto San Felipe. SAN FELIPE MINING. Inv. 5208. Oficina Nacional de Recursos Minerales, 1998.

Formell C., F. Informe III Comité de Administración San Felipe Mining, 1999.

Formell C., F. Diferencias en el desarrollo morfoestructural de las regiones metalogénicas exógenas de Oriente septentrional y Camagüey Central y su influencia en la formación de las cortezas de intemperismo níquelíferas. IV Congreso Cubano de Geología, La Habana, 2002.

Formell C., F. Cobas R. M., Rivers C., Ravelo L R., González V. Informe de Avance II Comité de Administración. Proyecto San Felipe. SAN FELIPE MINING. Inv. 5209. Oficina Nacional de Recursos Minerales, 1998.

Formell C., F. Papel de las ofiolitas en la evolución geodinámica de Cuba. Convención de Ciencias de la Tierra, 2008.

Francké J. Report to San Felipe Mining Ltd. on the Ground Penetrating Radar Survey San Felipe Nickel Deposit. Project No: PV46. Oficina Nacional de Recursos Minerales, September, 2002.

Freyssinet Ph. BRGM. BP 6009.45060 Orleans cedex. France; C. R. M. Blifit. R. C. Morris. Cooperative Research Centre for Lateritic Environments and Mineral Exploration. CSIRO Exploration and Mining and P. Piantone BRGM. BP 6009.45060 Orleans cedex. France. Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering, Society of Economic Geology 100th Anniversary Volume pp. 681- 722 PO. Box 1130 Bentley. Western Australia 6102, 2015.

Gallardo T, Chang A., Tauler E., Proenza J.A. El Yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba): un ejemplo de Lateritas Níquelíferas Tipo Arcilla macla nº 13. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. Págs. 87-88, 2010.

Gallardo T., Tauler E., García-Romero E., Proenza J.A., Suarez-Barrios M., Chang A. Caracterización Mineralógica de las Esmectitas Niquelíferas del Yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba). Revista de la Sociedad Española de Mineralogía Macla nº 15. Pág. 89-90, 2011.

Gaudin A., Decarreau A., Noark Y., Grauby O. Clay mineralogy of the nickel laterite ore developed from serpentinised peridotites at Murrin Murrin, Western Australia. Australian Journal of Earth Sciences – Aust J Earth SCI, Vol. 52, No. 2, pp 231-241, 2005.

González P. Dr. E. Yacimientos Minerales.

www.geociencias.unam.mx/Rmolina/Diplomado/Yacimientos.html, 2014-2015.

Griem W. Apuntes Depósitos Minerales. Bauxitas y Lateritas. Universidad de Atacama. Geovirtual. CI, 2007.

Hernández Ramsay A.J. Contribución de los métodos geofísicos para caracterizar, evaluar la calidad y seleccionar la mena laterítica y laterítica-saprolítica del norte de Cuba oriental. Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, no defendida, 2014.

Herrington R. Geological Features and Genetic Models of Mineral Deposits. SME Mining Engineering Handbook, Capítulo 3.1. Pág. 83 -104 Natural History Museum, London, UK, 2011.

Higueras Higueras, P. Universidad de Castilla-La Mancha y Oyarzun Muñoz R. Universidad Complutense de Madrid et al. Yacimientos Minerales. Manual online. Recursos Minerales. www.uclm.es/users/higueras/yymm/YM5.html, 2014.

http://www.unalmed.edu.co/rrodriguez/geologia/modelos_exploracion.htm.

Modelos en Exploración, 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_modelling. Scientific modeling 2015.

https://en.wikipedia.org/wiki/Conceptual_model, 2015.

http://www.ecured.cu/Geograf%C3%ADa_de_Cuba, 2015.

Lavaut Copa W. La Meteorización de las ofiolitas de Cuba Oriental. Modelos Geológicos y Terminología Cubana. Memorias: Convención GEOMIN 2003, Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano. La Habana, 24-28 de marzo. Sección TGMIN. 15-24 p, 2003.

Lavaut Copa W. et al. Informe final de la exploración, por la red 23.5x23.5 m, del yacimiento Yagrumaje Sur. Septiembre, 2007.

Marín Barba, P., Tauler E., Proenza J. Caracterización del perfil laterítico rico en níquel de San Felipe (Cuba) y separación de fases minerales mediante caída de partículas en un fluido viscoso. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona. España, 2011.

Marsh, E.E. and Anderson, E.D. Ni-Co Laterite deposits: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1259, 9 p, 2011.

Marsh, E., Anderson E., and Gray F. Nickel-cobalt laterites—A deposit model, Chapter H of Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-H, 38 p., <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/h/>, 2010.

Martínez-Quesada E. Caracterización de la flora vascular en la meseta de San Felipe, provincia Camagüey. Cuba, para su conservación. Centro de Investigaciones de Medio Ambiente de Camagüey (CIMAC). Caldasia v.32 n.1 Bogotá jan./jun. ISSN 0366-5232, 2010.

Mick Elias Principal Consultant CSA. Global Nickel Laterites in SE Asia Geology, Technology and Economics –Finding the Balance East Asia: Geology, Exploration Technologies and Mines BALI. May 27, 2013.

Mick Elias FAusIM (CP). Principal Consultan – Nickel CS Global Pt Lt. Internal. Report Overview o the Australia Nickel – Cobalt Industry Australia Report No: R119. 2012. www.csaglobal.com. Date: 24 January, 2013.

Milia G., I; Toledo Sánchez C.; Gómez Narbona L. Caracterización de ópalos de la meseta de San Felipe por métodos espectrales: VI Convención de Ciencias de la Tierra. Palacio de Convenciones, La Habana, 2015.

Mordberg Leonid, Karpinsky A.P. Nickel laterites of Russia and Kazakhstan Russian Geological Research Institute (VSEGEI) (Russian Federation) International Geological Congress Oslo. August 6-14. [MRD-07 Geology and mineral potential of CIS countries](#), 2008.

Moreira J., Kramer J., Martín R. Utilización de los modelos de exploración mineral y los SIG en la evaluación del potencial de recursos minerales, Macizo de Cajalbana, Cuba. En Memorias, VI Congreso de Geología (GEOLOGÍA/2005). Sección GEOMÁTICA, 2005.

Motito Marín. A. Diversidad de la flora de musgos en áreas secas de la provincia de Camagüey, Cuba, 2013.

Mudd, G M. The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future. Research Report No RR5, Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, October 2007. <http://civil.eng.monash.edu.au/publications/>, 2007.

Nagy, E. et al. Informe de los trabajos de levantamiento geológico de las antiguas provincias orientales, a escala 1:250.000. Instituto de Geología, Academia de Ciencias de Hungría; Instituto de Geología y Paleontología (IGP), Academia de Ciencias de Cuba. Inédito. Archivo del IGP, Ministerio de la Industria Básica, Ciudad de La Habana. 800 p, 1979.

Núñez, A., et al. Informe geológico sobre los trabajos de levantamiento y búsquedas a escala 1:100,000 y los resultados de los trabajos de búsqueda a escala 1:10,000 y 1:25,000 ejecutados en la parte este de la prov. de Guantánamo. Inédito. ONRM. C. Habana, 1981.

Núñez A., P. Gyarmaty, J. Leyçe, Zs. Peregy. Informe final sobre los resultados del levantamiento geológico y búsquedas acompañantes en el polígono V, Guantánamo, 1987-1990, Empresa Geológica Santiago. (Inédito). Archivo de la Oficina Nacional de Recursos Minerales, Ciudad de La Habana. 1069p, 1990.

Laborda M., Cadete La O M., Pérez A. R., Rodríguez C. A., Sosa R. I., Lavaut C. W., Bailly A. Informe final de la Reevaluación de Recursos y Reservas de Grupo VII Martí, Luz Norte, Pinares de Mayarí (Sector Este), 2005.

Lavaut W. La Meteorización de las Ofiolitas de Cuba Oriental. Modelos Geológicos y Terminología Cubana. Memorias: Convención GEOMIN 2003, La Habana, 24-28 de marzo. Sección TGMIN. 15-24 p, 2003.

Lavaut W. Problemática del estudio geológico de los principales yacimientos lateríticos de Cuba Oriental. En Primera Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (GEOCIENCIAS 2005). I congreso de Minería; II Simposio de Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas. Memorias, 2005.

Pérez R., X. Cazañas. A. I. Llanes, J. Triff, J. Moreira, M. R. Santos, V. Strazhevich. Informe sobre los resultados de: Determinación de la estructura y distribución areal de las cortezas lateríticas in situ y redepositadas en las zonas "Las Iberias" y "La Fangosa", mediante las técnicas de teledetección. Instituto de Geología y Paleontología, MINBAS. Inédito. Archivo Departamento Cartografía. IGP, 2005.

Proenza J.A. Depósitos "No Convencionales" de elementos del grupo de platino (EGP). Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales,

Universidad de Barcelona. Convención de Ciencias de la tierra Geociencias 2013, La Habana, Cuba, 2013.

¿Qué es un modelo? www.cursos.cl/ingeniería/2012/1/GL5311/1/MaterialDocente, 2013.

Rodríguez A., H. Rodríguez. Distribución del níquel en los yacimientos lateríticos cubanos. Revista Tecnológica, vol. XVIII, No.3. 19-28, 1987.

Rodríguez C, Ravelo L. Rey, Mostert A. B, Rivers C., Chang A, Akkerman J. H. San Felipe. Final Report Prospecting Sub-Phase 01-01-1998 to 30-09-2000. San Felipe Mining Geominera S.A. Inv. 5239. Oficina Nacional de Recursos Minerales, 2000.

Rodríguez Cardoso, A., Cobas Botey R. M. et al. Base geológica para argumentar el uso más integral de las lateritas. Inédito; 81 páginas. Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM), 1995.

Rodríguez I. A., C. N. Carralero. Condiciones geomorfológicas y neotectónicas de las zonas de desarrollo de yacimientos lateríticos de Moa. Minería y Geología. No. 1, 1984.

Rodríguez, R. Análisis Petrológico del Yacimiento San Felipe. Inédito, 2006.

Smirnov V.I. Geología de Yacimientos Minerales. Editorial MIR. Moscú. Págs. 385-434, 1982.

Spencer A. Yacimiento de Hierro en Camagüey. Inventario 441. Oficina Nacional de Recursos Minerales, 1908.

Tomazoni Neto, Francisco. Controle na distribuição das lateritas e saprolitos de alto teor no depósito de níquel laterítico do Jacaré, Distrito de Carajás, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa

de Pós-Graduação em Geociências. Master. <http://hdl.handle.net/10183/62056>, 2011.

Urra Abaira J. et al. Reporte Técnico sobre la estimación de recursos y reservas en los yacimientos La Delta, Cantarana y Santa Teresita. Moa Nickel S.A, 2009.

Vassallo I.f. ph.d. Yacimientos Minerales Metalicos, 4ta edición. Versión On Line, Bol-e Centro de Geociencias, UNAM. Querétaro, MEXICO. Registro en derechos de autor No. 5619, 2008.

Vikov, N., H. Rodríguez et al. Informe de los resultados de la prospección geológica en el sector La Delta. Inédito. Archivo, Oficina Nacional de Recursos Minerales. 310 p, 1983.

Wilson, M. J. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. The Macaulay Institute, Craigiebuckler, Aberdeen, AB15 8QH, UK. Clay Minerals 39, 233–266, 2004.